

Hochschule Esslingen
Fakultät Gebäude-Energie-Umwelt
Bachelor-Studiengang Gebäude-, Energie- und Umwelttechnik

Konstruktion und Untersuchung eines Systems zur induktiven Erwärmung durchströmter Speichermedien

Bachelorarbeit

von
Ian Parry Jones
Matrikelnummer: 745448

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Werner Braun
2. Prüfer: M. Eng. Sergej Belik
vorgelegt von: Ian Parry Jones
vorgelegt am: 18. 07. 2016

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Nutzung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder anderen Quellen entnommen worden sind, sind als solche eindeutig kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht veröffentlicht und noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt worden.

(Ort, Datum)

(Unterschrift)

Abstract/Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und energetische Untersuchung eines vielversprechenden Konzepts zur induktiven Erwärmung eines durchströmten Speichermediums. Zunächst werden dazu die Anforderungen an das Konzept im Hinblick auf den Einsatz im Kraftwerksmaßstab definiert. Anschließend erfolgt die Entwicklung von drei Konzepten von denen eines experimentell untersucht werden soll. Die These einer Effizienzsteigerung des Gesamtsystems durch Parametervariationen innerhalb des ausgewählten Konzeptes soll hierbei überprüft werden. Dazu wird ein bereits bestehender Teststand umgebaut. Während der Versuche werden Messdaten zu Temperatur, Volumenstrom und elektrische Leistungsdaten erfasst. Mit den Auswertungen der Messdaten wird der erzielte Gesamtwirkungsgrad der Anlage ermittelt, sowie die aufgestellte These auf ihre Plausibilität hin überprüft. Zuletzt werden Vorschläge zur Optimierung des untersuchten Systems erörtert.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	I
Abstract/Zusammenfassung	I
Inhaltsverzeichnis	II
1 Einleitung und Aufgabenstellung	1
2 Stand der Technik	2
2.1 Technologien der Elektrowärme	2
2.1.1 Widerstandserwärmung	2
2.1.2 Induktive Erwärmung	4
2.2 Thermische Energiespeicher	8
2.2.1 Sensible Wärmespeicher	9
2.2.2 Latentwärmespeicher	10
2.2.3 Thermochemische Energiespeicher	11
2.3 Bestehende Power-to-Heat-Anlagen	11
3 Konzeptentwicklung	14
3.1 Konzept 1 - Rundstäbe	16
3.2 Konzept 2 – Kugeln	16
3.3 Konzept 3 – „Blume“	17
3.4 Konzeptauswahl	18
4 Experimentelle Untersuchung	19
4.1 Versuchsaufbau	19
4.1.1 Stahlbehälter	19
4.1.2 Induktionsanlage	20
4.1.3 Weitere Komponenten	22
4.2 Implementierung der Messtechnik	23
4.2.1 Temperaturmessung der Speichermedien	25
4.2.2 Messung der Luftaustrittstemperatur	26
4.2.3 Weitere Messstellen	26
4.3 Versuchsvorbereitung	27
4.3.1 Auswahl des Stabdurchmessers	27
4.3.2 Anordnung der Stäbe	28
4.3.3 Prozessparameter	30
4.4 Versuchsdurchführung	30
4.4.1 Feldvermessung	31
4.4.2 Thermische Vermessung des Rostes	31
4.4.3 Thermografische Vermessung	32
4.4.4 Thermische Vermessung der Stabanordnungen	33

4.4.5	Thermische Vermessung der Luftaus- und Lufteintrittstemperatur	34
4.5	Versuchsauswertung	35
4.5.1	Auswirkungen der Feldhomogenität.....	35
4.5.2	Einfluss des Rostes	36
4.5.3	IR-Aufnahmen	37
4.5.4	Berechnung des elektrischen Wirkungsgrades	39
4.5.5	Berechnung der mittleren Luftaustrittstemperatur.....	41
4.5.6	Berechnung des Thermischen Wirkungsgrades.....	44
4.6	Fazit der experimentellen Untersuchung	48
5	Zusammenfassung und Ausblick	50
6	Literaturverzeichnis.....	53
7	Abkürzungsverzeichnis	54
8	Tabellenverzeichnis.....	55
9	Abbildungsverzeichnis.....	56
10	Anhang	58
	Anhang A – Messdaten und Berechnungsergebnisse	58
	Anhang B – Fließschema der Versuchsanlage.....	74
	Anhang C – Technische Zeichnungen	75

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Mit einem Anteil von über 30% an der Bruttostromerzeugung im Jahr 2015 spielen die erneuerbaren Energieträger mittlerweile eine wesentliche Rolle bei der Energieversorgung Deutschlands [1]. Die schwankende Einspeisung führt jedoch entweder zu Überkapazitäten und damit zur Abregelung konventioneller Kraftwerke und gelegentlich negativen Börsenpreisen für elektrischen Strom, oder zu Residuallasten die wiederum durch konventionelle Kraftwerke gedeckt werden müssen. Durch die Flexibilisierung von KWK-Anlagen und den Einsatz von Power-to-Heat können solche Überkapazitäten aus dem Stromsektor in den Wärmesektor verlagert und damit eine Kopplung der beiden Sektoren erzielt werden [2 bis 4].

Sowohl bei der Flexibilisierung von KWK-Anlagen als auch bei Power-to-Heat ist der Einsatz eines thermischen Energiespeichers vorteilhaft [2, 3], da überschüssige thermische Energie aufgenommen und zeitlich versetzt wieder abgegeben wird. Thermische Energiespeicher lassen sich dabei grundsätzlich als sensible, latente oder thermochemische Speichersysteme ausführen. Sensible Wärmespeicher finden bereits bei der Heizwasser- bzw. Warmwasserbereitung oder der Speisung von Fernwärmespeichern Verwendung. Latente- und thermochemische Wärmespeicher befinden sich bisher weitgehend in der Forschung und Entwicklung [5].

Für eine Umwandlung von elektrischer in thermische Energie stehen unterschiedlichste Verfahren zur Verfügung. Für Power-to-Heat-Anlagen im MW-Bereich werden bisher Widerstands- oder Elektrodenheizkessel eingesetzt [3]. Diese Technologien sind aus der industriellen Wärmetechnik bekannt und haben sich dort bereits seit Jahrzehnten etabliert. Einen innovativen Ansatz im Energiesektor stellt die Erwärmung durch elektromagnetische Induktion dar. Wesentliche Vorteile dieses Verfahrens sind eine berührungslose Leistungsübertragung und die Erzielung enormer Leistungsdichten [6]. Dabei wird ein Speichermedium mit elektrischem Strom induktiv erwärmt. Die Auskopplung der induzierten Wärme aus dem Speichermedium erfolgt durch dessen Durchströmung mit einem Wärmeträgermedium, welches anschließend einem thermischen Speicher mit deutlich höherer Speicherkapazität zugeführt wird. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und energetische Untersuchung eines vielversprechenden Konzepts zur induktiven Erwärmung eines durchströmten Speichermediums. Hierfür soll ein ausgewähltes Konzept mit Hilfe von experimentellen Daten untersucht und bewertet werden.

2 Stand der Technik

In den nachfolgenden Kapiteln soll auf die bereits heute zur Verfügung stehenden und die noch in der Entwicklung befindlichen Technologien der Elektrowärme, der thermischen Speichersysteme und bereits in der Kraftwerkstechnik realisierte Power-to-Heat-Anlagen eingegangen werden. Diese bilden den Rahmen für diese Arbeit und der Forschung auf dem Gebiet Power-to-Heat in Verbindung mit Thermischen Energiespeichern.

2.1 Technologien der Elektrowärme

Eine Umwandlung von elektrischer Energie in thermische Energie kann durch folgende physikalische Effekte erreicht werden:

- Beim direkten Stromdurchgang durch einen elektrischen Leiter treten reversible (Peltier- und Thomson-Effekt) und irreversible Verluste (Joule-Effekt) auf.
- Die Änderung der elektrischen bzw. magnetischen Polarisierung eines zu behandelnden Werkstoffes bewirkt reversible Wärmeeffekte und irreversible dielektrische bzw. magnetische Hystereseerscheinungen.
- Durch Absorption von elektromagnetischer Strahlung wie z.B. Infrarotstrahlung.

Die Wärmewirkung der reversiblen Verluste ist bei Wechselstrombetrieb im Mittel Null. Daher sind für Elektrowärmeanwendungen lediglich die irreversiblen Vorgänge von Bedeutung [6].

2.1.1 Widerstandserwärmung

Bei einem mit elektrischen Strom durchflossenen Leiter tritt ein irreversibler Wärmevorgang auf, der als Joule-Effekt bekannt ist. Diese sogenannte unmittelbare Widerstandserwärmung entsteht aufgrund von Reibungsvorgängen zwischen den fließenden Ladungsträgern (Elektronen) und dem ohmschen Widerstand des Leitermaterials. Da nach dem Grundsatz der Energieerhaltung keine Energie vernichtet oder neu geschaffen werden kann, muss die resultierende Abnahme der kinetischen Energie der Elektronen in thermische Energie umgewandelt werden. Die entstehende Wärme erhitzt den Leiter und wird

an die Umgebung abgegeben. Die Widerstandserwärmung kann auf zwei Arten erfolgen [7]:

- Bei der unmittelbaren Widerstandserwärmung ist das zu erwärmende Material ein Teil des Stromkreises (ohmscher Widerstand) und wird unmittelbar von einem elektrischen Strom durchflossen, s. Abbildung 1.
- Bei der mittelbaren Widerstandserwärmung findet eine Übertragung der jouleschen Wärme auf das Werkstück durch Wärmeleitung, Konvektion oder Wärmestrahlung statt, s. Abbildung 2.

Typische Anwendungsbereiche der unmittelbaren Widerstandserwärmung sind das Erwärmen von metallischem Gut in Stand- bzw. Durchlaufanlagen, Hochstromofen zur Herstellung von Graphit und Siliciumcarbid, Wassererwärmung und Dampferzeugung in Elektrodenkesseln, Schmelzen von Glas und Schmelzen von Nichteisenmetallen durch Schmelzflusselektrolyse. Je nach Einsatzgebiet werden Spannungen von wenigen Volt bei der Thermischen Elektrolyse bis hin zu 30 kV bei Elektrodenheizkesseln erreicht. Weiterhin sind abhängig vom Anwendungsgebiet Stromstärken und Temperaturen von 100 kA respektive 1500 °C möglich [6].

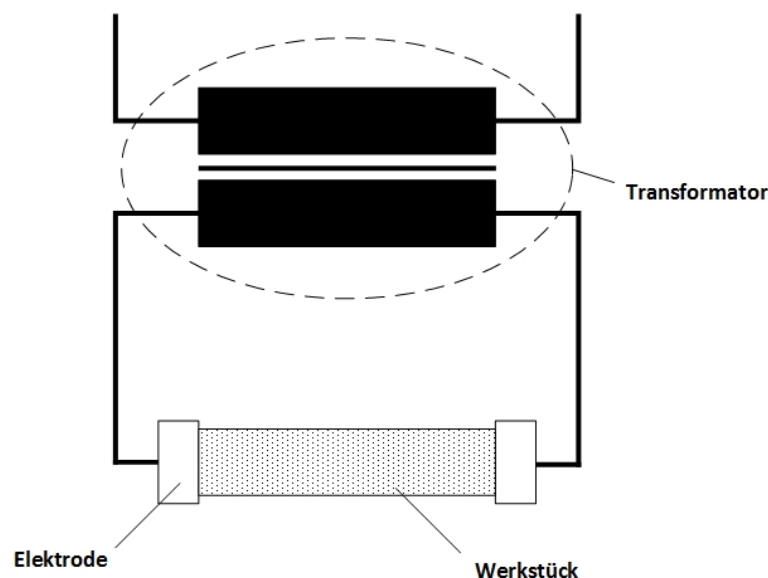


Abbildung 1 Prinzip der unmittelbaren Widerstandserwärmung

Die mittelbare Widerstandserwärmung bietet ein besonders großes Anwendungsspektrum. Die verwendeten Widerstandsöfen bieten die Möglichkeit zur Warmhaltung und dem Schmelzen von Metallen, Silizium, Germanium und Glas, der Wärmebehandlung

durch Härten, Glühen, Anlassen, Aufkohlen, Nitrieren und dem Trocknen von Farben, Lacken und Papieren. Mit Heizelementen aus Hochtemperaturmaterialien wie Molybdän, Niob, Tantal, Wolfram und Graphit sind in Vakuumöfen Temperaturen bis 3000 °C realisierbar. Die Anschlussleistung kann dabei mehrere 100 kW betragen [6].

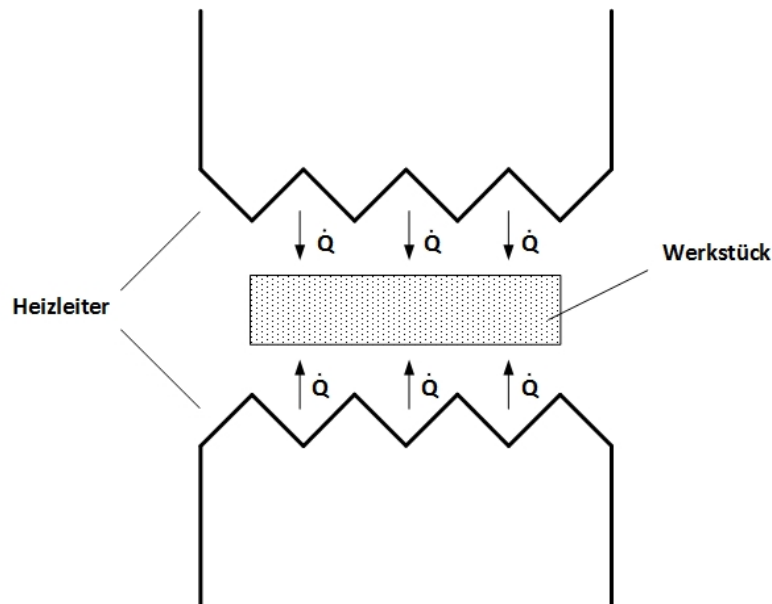


Abbildung 2 Prinzip der mittelbaren Widerstandserwärmung

2.1.2 Induktive Erwärmung

Grundlage der induktiven Erwärmung ist das Induktionsgesetz. Durch Anlegen eines Wechselstroms ($I_{\text{Spule}} \sim$) an eine Drahtspule entsteht ein wechselndes elektromagnetisches Feld ($\Phi \sim$). Befindet sich innerhalb der Spule ein elektrischer Leiter, so werden in diesem kreisförmig fließende elektrische Ströme induziert ($I_{\text{ws}} \sim$). Diese sogenannten Wirbelströme besitzen nach dem Lenz'schen Gesetz eine dem Spulenstrom entgegengesetzte Fließrichtung und sorgen aufgrund des Joule-Effektes für eine Erwärmung des elektrischen Leiters, s. Abbildung 3 [7].

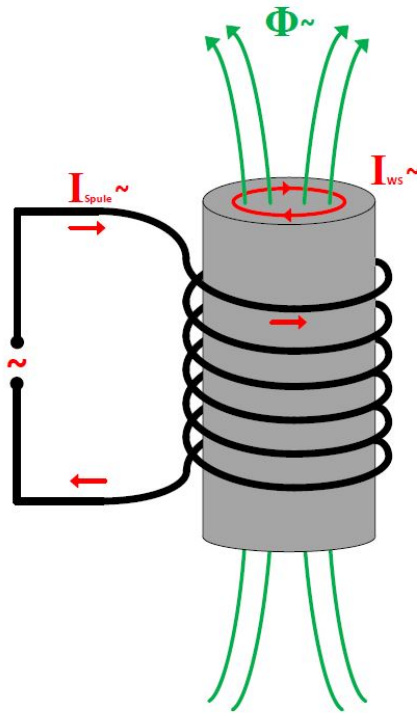


Abbildung 3 Induktive Erwärmung eines Metallzylinders

Induktionsanlagen bestehen grundsätzlich aus einem Leistungs- und einem Arbeitskreis, s. Abbildung 4. Der Leistungskreis setzt sich aus dem Netzanschluss, dem Frequenzgenerator, dem Kompensationsfeld und dem Transformator zusammen. Induktor und Werkstück bilden den Arbeitskreis. Um ein Werkstück zu erwärmen muss zunächst der Dreiphasenwechselstrom des Versorgungsnetzes durch den Frequenzgenerator in einen einphasigen Wechselstrom höherer Frequenz umgewandelt werden. Anschließend wird mit Hilfe des Transformators die hochfrequente Spannung zu einem hochfrequenten Strom transformiert. Die Leistung wird dann auf den aus einem Kupferrohr bestehenden Induktor übertragen, welcher von Kühlwasser durchströmt wird. Die Form des Induktors wird der des Werkstücks angepasst, um einen möglichst gleichmäßigen und energieeffizienten Erwärmungsprozess zu erzielen [7]. Werkstück und Induktor können hierbei als Sekundär- und Primärwicklung eines Transformators betrachtet werden. Das Kompensationsfeld besteht aus Kondensatorschaltungen, welche zur Kompensation der im Prozess entstehenden induktiven Blindleistung eingesetzt werden. Ein ferromagnetischer Werkstoff erfährt eine zusätzliche Erwärmung durch die Ummagnetisierung infolge des sich stetig wechselnden magnetischen Feldes. Allerdings verlieren ferromagnetische Stoffe oberhalb der werkstoffspezifischen Currie-Temperatur ihre ferromagnetischen Eigenschaften.

Dadurch entfällt der Anteil der Ummagnetisierungsverluste (Hystereseverluste), was zur Reduzierung der Wirk- und zur Erhöhung der Blindleistung im Prozess führt [8].

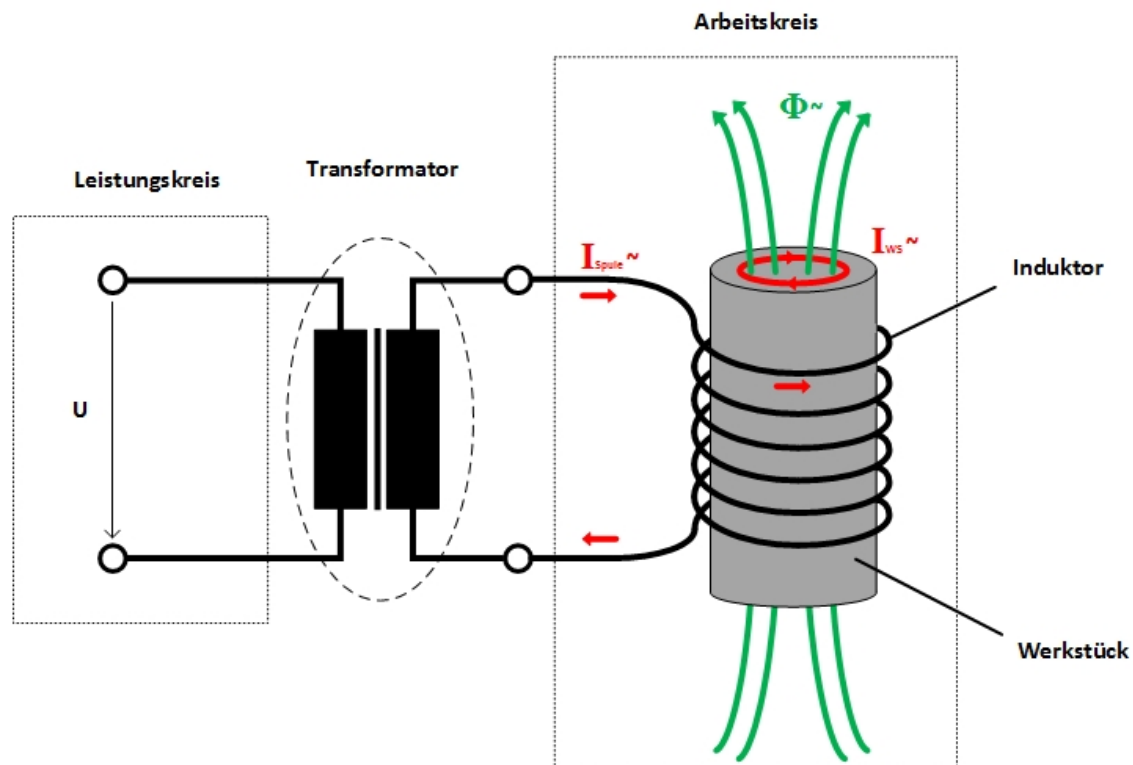


Abbildung 4 Arbeits- und Leistungskreis einer Induktionsanlage

Die von Wechselströmen höherer Frequenz induzierten Ströme fließen zum größten Teil an der Oberfläche eines zu erwärmenden Werkstücks. Diese Erscheinung wird als Skin-effekt bezeichnet, s. Abbildung 5. Ursache für diesen Effekt ist die Dämpfung der in das Werkstück eindringenden Wechselfelder aufgrund der hohen Leitfähigkeit des Materials. Die abnehmende Feldenergie wird dabei in Wirbelströme und damit in Wärme umgewandelt. Die Dicke der erwärmten Oberflächenschicht ist dabei abhängig von der Frequenz, den magnetischen und den elektrischen Eigenschaften des Werkstoffs. Die Stromdichte J nimmt von der Oberfläche hin zum Werkstoffinneren exponentiell ab. Ist die Stromdichte auf 37% ihres Maximalwertes J_0 gesunken, spricht man von der Stromeindringtiefe δ . In diesem Bereich werden 86% der induzierten Leistung in Wärme umgewandelt, die restlichen 14% werden von tiefer gelegenen Schichten absorbiert. Eine hohe Frequenz kann dann etwa zum Oberflächenhärten, eine niedrige Frequenz zur durchgreifenden Erwärmung genutzt werden [9].

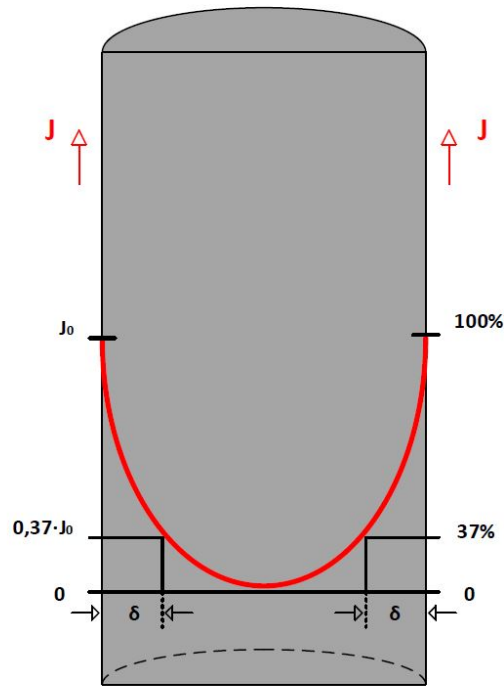


Abbildung 5 Stromeindringtiefe

Im Gegensatz zur Widerstandserwärmung kann die Erwärmung eines Werkstückes kontaktlos, durch z.B. eine Behälterwand aus nicht elektrisch leitendem Material hindurch, erfolgen. Zudem wird die Wärme unmittelbar im Werkstück erzeugt und muss nicht durch Konvektion, Wärmestrahlung oder Wärmeleitung übertragen werden, welches eine Anwendung in beliebiger Atmosphäre oder einem Vakuum zulässt. Die hierdurch erzielbaren Leistungsdichten sind, wie Tabelle 1 zeigt, weitaus höher als bei anderen Erwärmungsverfahren und ermöglichen damit eine deutlich schnellere und gezieltere Erwärmung [8].

Tabelle 1 Leistungsdichten unterschiedlicher Erwärmungsarten [8]

<i>Erwärmungsart</i>	<i>Leistungsdichte in W/cm^2</i>
Konvektion	0,5
Strahlung	8
Wärmeleitung	20
Flamme	1000
Induktionserwärmung	30.000

Durch die Anpassung der Frequenz und der daraus resultierenden Stromeindringtiefe an den Werkstückdurchmesser, lassen sich im industriellen Bereich hohe elektrische Wirkungsgrade von über 90 % erzielen [8]. Eine gute Steuer-, Mess-, und Dosierbarkeit der Leistungszufuhr der induktiven Erwärmung sind, im Hinblick auf eine rasche und präzise Bereitstellung negativer Regelenergie, von großem Interesse für den Regelenergiemarkt.

2.2 Thermische Energiespeicher

Thermische Energie kann auf unterschiedliche Weise gespeichert werden. Grundsätzlich kann zwischen sensibler, latenter und thermochemischer Speicherung unterschieden werden, s. Abbildung 6 [3].

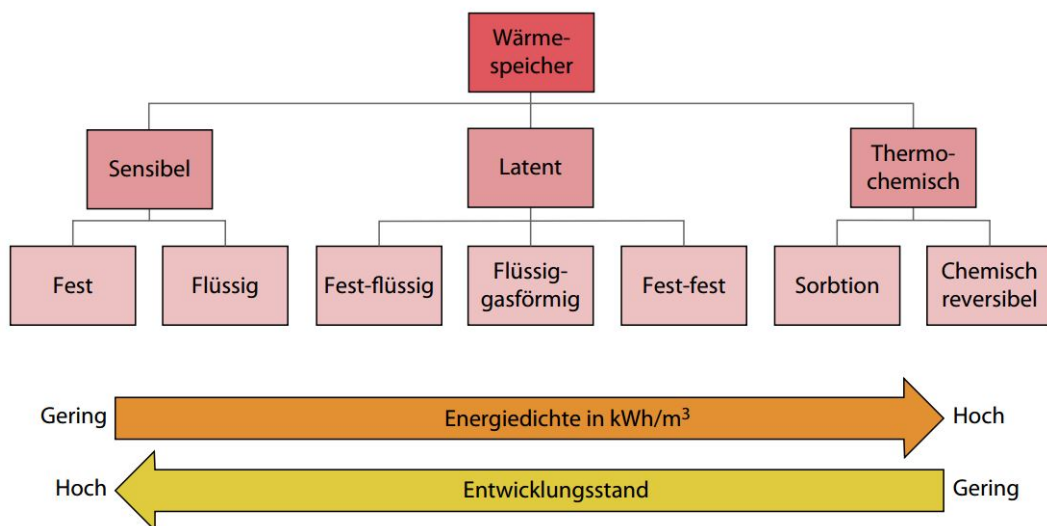


Abbildung 6 Übersicht Speichertechnologien thermischer Energiespeicher [3]

Der Einsatzbereich wird durch die Temperaturen beim Laden und Entladen bestimmt. Im Hochtemperaturbereich von 300 °C bis 600 °C finden thermische Speicher Anwendung im Zusammenspiel mit solarthermischen Kraftwerken, Druckluftspeichern und der Abwärmenutzung in der Glas- und Stahlindustrie. Für die Bereitstellung von Prozesswärme und damit vor allem Dampf sind niedrigere Temperaturen von 100 °C bis 250 °C notwendig. Der Temperaturbereich von 25 °C bis 90 °C ist für die Heizungstechnik und die Brauchwasserbereitung von Interesse. Bei Temperaturen von deutlich unter 25 °C kann

von Kältespeichern gesprochen werden. Sie dienen der Gebäudeklimatisierung, sowie der Kühlung und dem Gefrieren von Lebensmitteln [3].

Die erforderliche Speicherdauer stellt den Zeitraum zwischen dem Laden und Entladen des Speichers dar. Sie reicht bei Kurzzeitspeichern von Stunden bis hin zu einigen Tagen und bei Langzeitspeichern über mehrere Wochen bis hin zu einem Jahr. Beim Standort des Speichers kann zwischen zentralen und dezentralen Speichersystemen unterschieden werden. Eine eindeutige Definition existiert nicht. Bei Speichern die sich in relativer Nähe zu einem Kraftwerk befinden wird von zentralen Speichern gesprochen. Der in einem Einfamilienhaus vorhandene Pufferspeicher wird als klassischer dezentraler Speicher angesehen [3].

2.2.1 Sensible Wärmespeicher

Die sensible Speicherung thermischer Energie hat immer eine fühlbare Änderung der Temperatur zur Folge. Das entsprechende Speichermedium wird je nach Einsatzzweck erwärmt oder abgekühlt. Damit lassen sich sowohl Wärme als auch „Kälte“ speichern.

Sensible Wärmespeicher sind vor allem aus der Warmwasserbereitung bekannt und werden in der Heizungstechnik als Pufferspeicher verwendet. Durch die teilweise enormen Temperaturunterschiede von mehreren hundert Grad Celsius zwischen Speichermedium und Umgebung ist die ausreichende Dämmung von großer Bedeutung um Wärmeverluste weitestgehend zu vermeiden. Im Niedertemperaturbereich wird Wasser als Speichermedium gewählt, da es eine hohe Wärmekapazität, eine gute Umweltverträglichkeit, eine hohe Verfügbarkeit und geringe Kosten aufweist. Im Hochtemperaturbereich werden Feststoffe wie Kies oder andere Gesteine als Speichermedium etwa in sogenannten Winderhitzern eingesetzt. Diese auch als Regeneratorspeicher bekannten Systeme erreichen dabei Temperaturen von über 1000 °C und finden in der Glas- und Stahlindustrie Anwendung [10]. Erforscht werden derzeit zudem Sande, Keramiken und Beton als mögliche Speichermedien.

Im direkten Vergleich mit Latentwärmespeichern und thermochemischen Speichern besteht ein Nachteil vor allem in der geringeren Energiedichte der sensiblen Wärmespeicher. Durch die deutlich ausgereifere Technik und eine kostengünstigere Verfügbarkeit sind sensible Wärmespeicher jedoch gerade aus wirtschaftlicher Sicht weitaus attraktiver.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die aktuellen Kosten zur Speicherung einer Kilowattstunde [3].

Tabelle 2 Übersicht der Kosten verschiedener Speichersysteme

<i>Speicherart</i>	<i>Kosten eines Speichers in €/kWh</i>
sensibel	0,1 - 10
latent	10 - 50
thermochemisch	8 - 100

2.2.2 Latentwärmespeicher

Zusätzlich zur Erhöhung oder Absenkung der Temperatur nutzen Latentwärmespeicher einen Phasenwechsel (engl. Phase Change Materials, kurz PCM) des Speichermediums. Hierbei wird üblicherweise der Phasenübergang fest-flüssig verwendet um eine zu große Volumenänderung zu vermeiden und die hohe Übergangsenthalpie zu nutzen. Mit Latentwärmespeichern können sowohl Wärme als auch „Kälte“ gespeichert werden. Im Vergleich zu sensiblen Wärmespeichern kann bei kleinen Temperaturunterschieden wesentlich mehr thermische Energie gespeichert werden. Weiterhin sind die Temperaturen beim Laden und Entladen über lange Zeit konstant. Durch den breiten Schmelztemperaturbereich von -40 °C bis über 1000 °C der verschiedenen Materialien ergibt sich ein großer Einsatzbereich, s. Abbildung 7. Anwendung finden Latentwärmespeicher bereits als Eisspeicher in Kombination mit Wärmepumpen, als Wärmekissen und bei Solarkraftwerken [3].

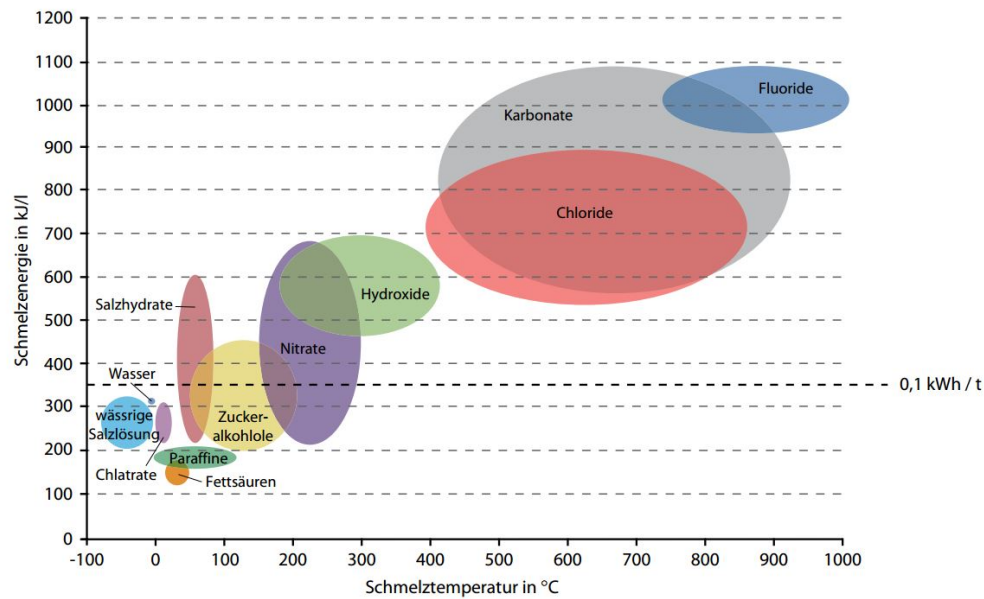


Abbildung 7 Übersicht PCM Schmelztemperaturen und -energie [3]

2.2.3 Thermochemische Energiespeicher

Zur Speicherung von Wärme mit thermochemischen Energiespeichern werden reversible chemische Reaktionen genutzt. Die Reaktionsprodukte werden dabei getrennt und über längere Zeit gespeichert. Eine solche Trennung hat dabei keinerlei Speicherverluste zur Folge. Die Beladung des thermochemischen Speichers erfolgt durch endotherme Reaktionen, die Entladung durch exotherme Reaktionen. Es lassen sich damit sehr hohe Energiespeicherdichten von bis zu 1,67 kWh/kg erzielen. Die gewünschten Temperaturniveaus beim Laden und Entladen des Speichers können den aktuellen Bedürfnissen angepasst werden. In der Praxis finden thermochemische Energiespeicher zurzeit so gut wie keine Anwendung, da diese sich noch in der Grundlagenforschung befinden. Eine Sonderform der thermochemischen Energiespeicher stellen die Sorptionsspeicher dar. Die bei z.B. Absorptions- und Adsorptionskältemaschinen verwendeten Absorptions- und Adsorptionsprozesse basieren mehr auf physikalischen als auf chemischen Vorgängen. Sorptionsspeicher werden jedoch allgemein den thermochemischen Energiespeichern zugeordnet [3].

2.3 Bestehende Power-to-Heat-Anlagen

Im industriellen Bereich besteht ein erheblicher Bedarf an Hochtemperatur-Prozesswärme. Neben KWK-Anlagen und Gasheizwerken gibt es bisher jedoch kaum auf dem

Markt befindliche technologische Alternativen. Durch die Kombination beider Kraftwerkstypen mit Elektroheizwerken können solch hybride Systeme äußerst effizient auf erneuerbare Überschüsse und Deckungslücken im Strommarkt reagieren. Ein wirtschaftlicher Einsatz solcher Power-to-Heat-Anlagen ist im industriellen Maßstab aus heutiger Sicht nur im Regelleistungsmarkt denkbar [3]. In Deutschland ergibt sich für Power-to-Heat ein sehr großes Potenzial von ca. 200 GW im Winter und bis zu 50 GW im Sommer. Die niedrigen Investitionskosten von etwa 100 €/kW machen die Power-to-Heat Technologie zudem interessant für die nur wenige Stunden im Jahr auftretenden Leistungsspitzen [3].

Bisher umgesetzte Power-to-Heat-Anlagen verwenden Elektrodenheizkessel um kurzfristige Stromüberschüsse und damit negative Regelennergie in Form von Dampf oder Warm- bzw. Heißwasser in die Prozesswärme einzubinden. Stammen die Stromüberschüsse aus regenerativen Quellen kann auf eine Verwendung fossiler Energieträger somit verzichtet werden. Weiterhin ist etwa bei einer Kraftwerksrevision und dem damit verbundenen Stillstand eine Versorgung des Fernwärmenetzes gewährleistet [3].

Die Funktionsweise eines solchen Elektrodenheizkessels ist der Elektrolyse sehr ähnlich. Hierbei werden unter Spannung stehende Elektroden direkt mit Wasser in Kontakt gebracht. Im Gegensatz zur Elektrolyse kommt hier jedoch Wechselstrom zum Einsatz. Die elektrolytische Zerlegung des Wassers in Sauerstoff und Wasserstoff wird so unterbunden. Eine Regelung kann durch leitfähigkeitserhöhende Substanzen oder durch die Änderung des Wasserstandes erzielt werden.

Die bisher in Deutschland installierten Power-to-Heat-Anlagen für industrielle Anwendungen bewegen sich größtenteils im einstelligen bis niedrigen zweistelligen Megawatt Bereich. Der Stromanbieter N-ERGIE AG aus Nürnberg hat Ende 2014 seine erste Power-to-Heat-Anlage erfolgreich in Betrieb genommen. Zum Einsatz kommen zwei Elektrodenheizkessel mit einer Anschlussleistung von jeweils 25 MW. Diese speisen einen 33.000 Kubikmeter fassenden 70 m hohen und 26 m breiten Wärmespeicher, der damit zu den höchsten in Europa zählt, s. Abbildung 8.



Abbildung 8 Wärmespeicher der N-ERGIE AG in Nürnberg [11]

Mit ihm können Speichertemperaturen von bis zu 120 °C erreicht und eine Wärmemenge von bis zu 1500 MWh gespeichert werden. Durch die Elektrodenheizkessel und den Wärmespeicher ist eine zeitliche Entkopplung der Strom- und Wärmeerzeugung des Heizkraftwerks, das nach dem KWK-Prinzip arbeitet, möglich. Dies erhöht die Flexibilität des Kraftwerks und die Einspeisemöglichkeiten für erneuerbare Energien. So wird etwa an trüben windarmen Tagen und dem damit größeren Strombedarf die nicht genutzte Wärme in den Speicher geladen. Bei einer hohen Einspeisung erneuerbaren Stroms in das Stromnetz, wird das Kraftwerk gedrosselt und die Versorgung des Fernwärmenetzes wird durch den Wärmespeicher gewährleistet. Jährlich können mit dieser Power-to-Heat-Anlage 40.000 t CO₂ eingespart werden [12].

3 Konzeptentwicklung

In der vorangegangenen Arbeit am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) sind bereits vielversprechende Konzeptvarianten für eine induktive Erwärmung eines Speichermediums erarbeitet worden. Zunächst wurden die Vor- und Nachteile des Integrationsortes des Induktors, innerhalb bzw. außerhalb des Speicherbehälters, untersucht, s. Abbildung 9. Eine Anordnung des Induktionssystems vor dem thermischen Energiespeicher stellte sich dabei als die bessere der beiden Lösungsvarianten dar. Der Grund hierfür ist der wassergekühlte Induktor des Induktionssystems, der bei einer Anordnung innerhalb des thermischen Energiespeichers als Wärmesenke fungieren würde. Durch eine Platzierung außerhalb des thermischen Energiespeichers wird die im Induktionssystem entstehende Wärme konvektiv an das durchströmte Speichermedium des thermischen Energiespeichers abgegeben [13].

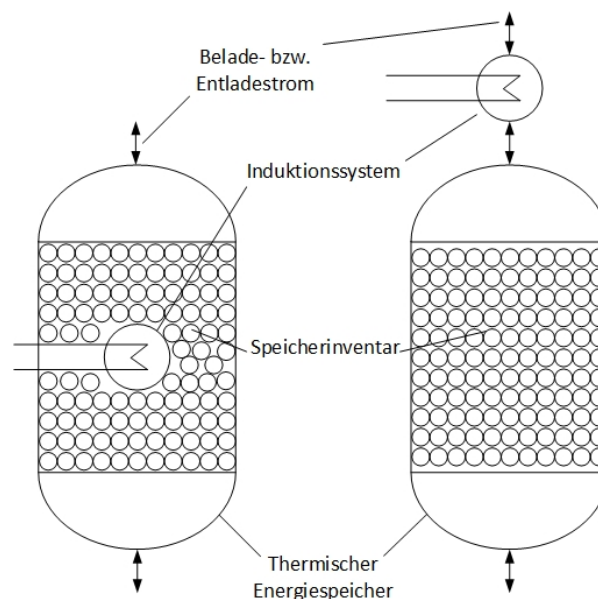


Abbildung 9 Varianten des Integrationsortes des Induktionssystems

Weitere Fragestellungen ergeben sich beim Aufbau des Arbeitskreises der Induktionsanlage und den verschiedenen Möglichkeiten der Anordnung von Induktor, Induktionsrohr und der zur Lufterwärmung erforderlichen Wärmeübertragungsstruktur. Ein Konzept zur induktiven Erwärmung des Induktionsrohrs mit im Inneren befindlichen Längsrippen ist bereits untersucht worden, s. Abbildung 10. Die Erwärmung der Längsrippen erfolgte dabei konvektiv durch das Induktionsrohr [13].

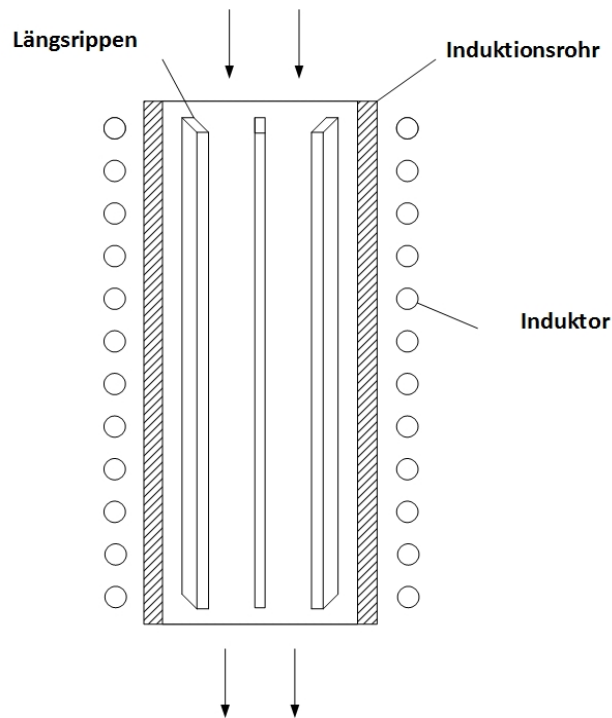


Abbildung 10 Induktionsrohr mit Längsrippen

Die für diese Arbeit zu entwickelnden Konzepte sehen eine direkte Erwärmung des Speichermediums vor. Das von Luft durchströmte Rohr dient dann lediglich der Strömungsführung und ist nicht Teil der Wärmeübertragungsstruktur.

Zunächst werden hierfür drei Konzepte mit unterschiedlichen Geometrien für eine Platzierung innerhalb des Rohres entwickelt. Das Anforderungsprofil an die zu entwickelnden Konzepte sieht dabei einen Temperaturgradienten von mindestens 200 K zur Beladung eines sensiblen Wärmespeichers, die schnelle Bereitstellung von negativer Regelleistung und die Erzielung eines Gesamtwirkungsgrades von mehr als 70 % vor. Um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Geometrien zu erhalten, soll bei allen der gleiche ferromagnetische Werkstoff verwendet werden. Ferromagnetische Stoffe weisen eine sehr hohe Permeabilitätszahl auf, wodurch sie in der Elektrotechnik häufig zum Einsatz kommen. Beim Anlegen eines äußeren Magnetfelds richten sich die magnetischen Momente eines Ferromagneten parallel zu diesem Feld aus. Die magnetische Flussdichte steigt im Inneren des Werkstoffs im Vergleich zum Außenraum stark an und führt somit zu einer starken Erwärmung. Die Wahl des ferromagnetischen Werkstoffs fällt hier auf den Baustahl S235JR. Vorteile dieses Stahls sind die bei unterschiedlichen Temperaturen gut bekannten Werkstoffdaten, wie die des spezifischen elektrischen Widerstands ρ und der Permeabilitätszahl μ_r . Sie dienen unter anderem zur Berechnung der

Stromeindringtiefe in ein entsprechendes Werkstück. Weitere Vorteile sind die breite Verfügbarkeit und die kostengünstige Beschaffung, im Hinblick auf einen späteren wirtschaftlichen Einsatz als Speichermedium.

3.1 Konzept 1 - Rundstäbe

Das erste Konzept sieht einen Einsatz von Rundstäben vor. Im Bereich der Elektrowärme sind für diese Geometrie schon seit vielen Jahren Daten zur induktiven Erwärmung einzelner Rundstäbe bekannt. Um eine gute Durchströmung, einen optimalen Wärmeübergang auf die Luft und eine hohe induzierte Leistung zu ermöglichen, kann jedoch kein einzelner Stab mit dem Innendurchmesser des Rohres verwendet werden. Ebenso erscheint die Verwendung eines einzelnen Stabes mit kleinem Durchmesser aufgrund der zuvor genannten Gründe wenig sinnvoll. Eine Platzierung mehrerer Stäbe innerhalb des Rohres liegt hier also Nahe. Dies stellt einen völlig neuen und vielversprechenden Ansatz der induktiven Erwärmung dar. Durch die Verwendung mehrerer Stäbe kann im Vergleich zu einem Stab die gesamte Mantelfläche zur konvektiven Wärmeübertragung auf die strömende Luft deutlich erhöht werden. Die Hohlräume zwischen den Stäben gewährleisten im Gegensatz zur Verwendung eines einzelnen großen Stabes eine ausreichende Durchströmung.

3.2 Konzept 2 – Kugeln

Das zweite Konzept bildet eine Schüttung aus Kugeln. Eine solche Schüttung lässt sich einfach ausführen und benötigt bis auf einen Tragrost keine speziellen Halterungen. Weiterhin bieten Kugeln ein gutes Verhältnis von Oberfläche zu Volumen, welches für einen optimalen Wärmeübergang von Kugeloberfläche zu durchströmender Luft von Vorteil ist. Diese Eigenschaften werden sich vor allem in der petrochemischen Industrie zu Nutze gemacht, wo Schüttungen dieser Art für Trennprozesse und zur Kühlung von Gasen und Flüssigkeiten eingesetzt werden [14].

Der Porositätswert einer unendlich ausgedehnten Schüttung beträgt etwa 0,4. Durch unterschiedliche Schüttverfahren werden in der Praxis jedoch abweichende Porositätswerte erreicht. Begrenzt man die Schüttung durch eine Rohrwand und einen Tragrost, so beeinflussen diese den radialen Porositätsverlauf. Die Porosität nimmt von der Rohrwand hin

zur Mitte der Schüttung nach einer Besselverteilung ab. Am Rand der Schüttung beträgt der Wert der Porosität nahezu eins. Dies ist auf die punktförmige Berührung zwischen Kugeln und Rohrwand zurückzuführen. In der Mitte der Kugelschüttung wird ein Wert von etwa 0,4 erreicht [13]. Der Porositätsverlauf bedingt eine örtliche Veränderung der Strömungsbedingungen. Am Austritt der Kugelschüttung herrscht in der Nähe zur Rohrwand ein Geschwindigkeitsmaximum. Dieses klingt zur Mitte hin ab. Dort bildet sich eine gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung aus, wie sie auch von einem leeren durchströmten Rohr bekannt ist. Die im Vergleich zur Rohrmitte höhere Strömungsgeschwindigkeit in Wandnähe kann auf die größere freie durchströmte Fläche aufgrund der geringeren Porosität zurückgeführt werden.

Da die Porositätsverteilung wie bereits erwähnt von den Schüttverfahren abhängt, werden in der Praxis keine gleichmäßigen Schüttungen erreicht. Dies hat einen erheblichen Einfluss auf die Geschwindigkeitsverteilung und den Druckverlust. Zwischen berechneten und gemessenen Werten herrschen daher in der Literatur erhebliche Abweichungen vor. Eine Vergleichbarkeit numerischer Simulationen mit gemessenen Daten ist dadurch deutlich erschwert [14].

3.3 Konzept 3 – „Blume“

Bei diesem Konzept werden Bleche mit einer speziellen Geometrie verwendet. Die Form erinnert dabei an ein Blütenblatt. Für eine optimale Strömungsverteilung wurde auf eine ausgeglichene Verteilung der durchströmten Flächen geachtet. Die in Abbildung 11 rot gekennzeichnete Fläche entspricht der des grün markierten Bereichs. Beide Flächen zusammengenommen entsprechend der violett eingefärbten Fläche.

Die innere Fläche soll der Ausbildung von Wirbelströmen dienen. Die Abgabe der entstehenden Wärme würde dann durch Wärmeleitung an die durchströmten „Blütenblätter“ erfolgen. Eine Vielzahl solcher Bleche soll gestapelt als Paket innerhalb der Spule platziert werden, ähnlich einem Blechpaket aus Trafoblech bzw. Elektroblech.

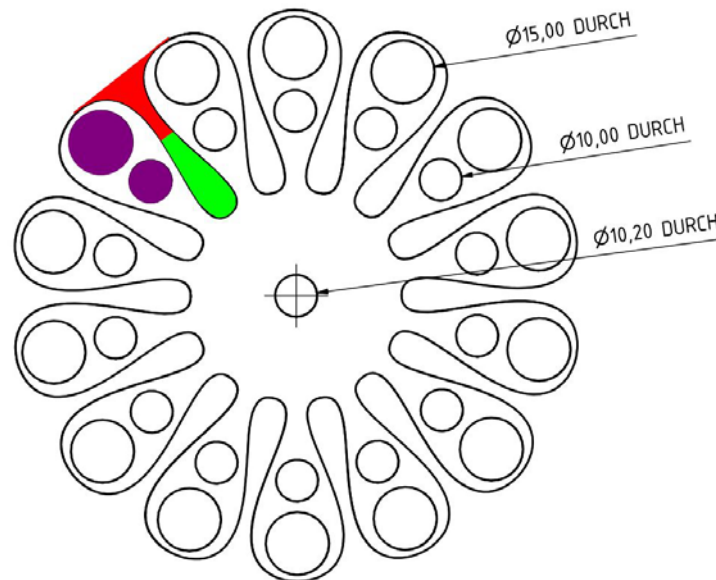


Abbildung 11 Zeichnung des Konzepts "Blume"

3.4 Konzeptauswahl

Für die experimentellen Untersuchungen ist eines der Konzepte auszuwählen. Da die entwickelten Konzepte 2 und 3 aufgrund ihrer komplexeren geometrischen Beziehung zum eingekoppelten elektromagnetischen Feld zunächst weiterer Vorüberlegungen bezüglich der Testumgebung bedürfen, soll der Fokus dieser Arbeit auf das Konzept der Rundstäbe gerichtet werden. Dazu werden Stäbe des gleichen Durchmessers und einer variierenden Anzahl bzw. Anordnung getestet. Eine genauere Beschreibung der Anordnungen und aller weiteren Versuchsparameter erfolgt im nachfolgenden Kapitel. Mit einer steigenden Anzahl von Stäben, bis hin zur größtmöglichen Packungsdichte, wird aufgrund eines höheren ohmschen Widerstandes vermutlich eine höhere induzierte Leistung erzielt. Darüber hinaus führt die Erhöhung der Staboberfläche zu einer höheren thermischen Leistungsübertragung auf den Luftstrom. Somit hat dies eine Steigerung der Energieeffizienz zur Folge und damit auch eine Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades. Diese Thesen werden im experimentellen Teil dieser Arbeit ausführlich untersucht.

4 Experimentelle Untersuchung

Um das in Kapitel 3 ausgewählte Konzept experimentell zu untersuchen, werden Teile des bereits bestehenden Teststands umgebaut. Daher soll nachfolgend eine genaue Beschreibung der gesamten Testanlage, des Versuchsaufbaus und der eingesetzten Messtechnik erfolgen. Weiterhin werden die gewonnenen Messdaten ausgewertet und zur Verifizierung der in Kapitel 3 aufgestellten These verwendet.

4.1 Versuchsaufbau

Die für die experimentellen Untersuchungen eingesetzte Testanlage besteht hauptsächlich aus dem Druckbehälter, der Induktionsanlage und der eingesetzten Messtechnik. Weitere Komponenten wie das Quarzglasrohr, der Rost und dessen Halterung, die Druckluftanbindung, sowie die Kühlung werden ebenfalls vorgestellt.

4.1.1 Stahlbehälter

Für die bereits in der vorangegangenen Arbeit experimentell untersuchten Konzepte, ist ein Stahlbehälter konstruiert worden, der eine Druckbeständigkeit von bis zu 6 bar aufweist, s. Abbildung 12. Im Inneren des Stahlbehälters werden die zu testenden Konzepte angeordnet. Über die zahlreichen Öffnungen in der Außenwand erfolgt die Durchführung des Induktors und der Messtechnik. Zudem kann über einen Sichtflansch der Erwärmungsprozess beobachtet und visuell erfasst werden. Die Durchströmung des Behälters mit einem Luftstrom erfolgt von oben.

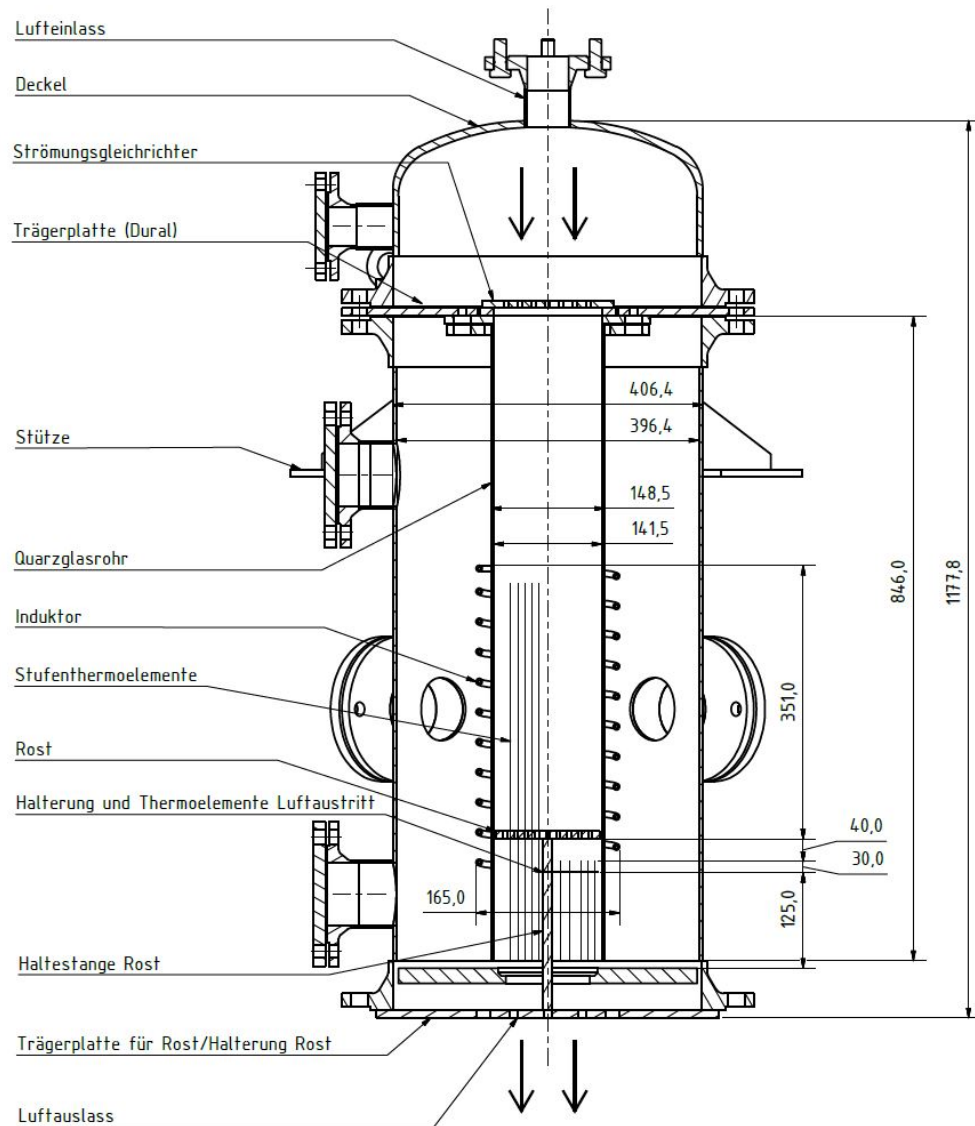


Abbildung 12 Stahlbehälter mit Einbauten

Die Gesamte Stahlkonstruktion, sowie der Schaltschrank für die Messtechnik sind an einem Gestell aus Aluminiumprofilen befestigt. Am unteren Ende des Stahlbehälters ist eine runde Stahlplatte befestigt. An ihr sind der Kühler und die Halterung des Rostes montiert.

4.1.2 Induktionsanlage

Die für diesen Teststand eingesetzte Mittelfrequenz-Induktionsanlage der Fa. Alphotronic GmbH (Typ: MFG-40/1), besteht grundsätzlich aus dem Frequenzgenerator, dem Kompensationsfeld/Schwingkreis und dem Induktor, s. Abbildung 13 und Abbildung 14.



Abbildung 13 MF-Generator

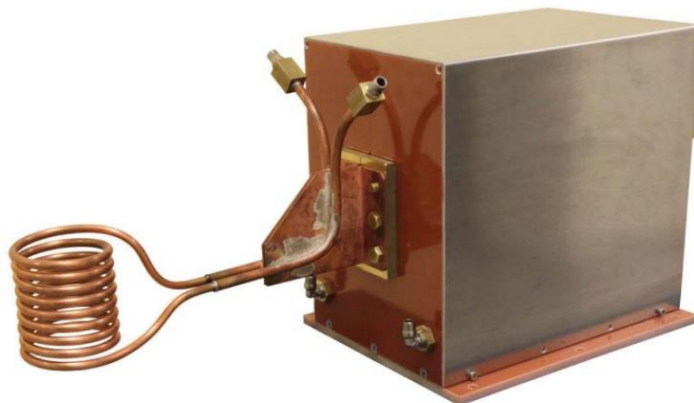


Abbildung 14 Kompensationsfeld/Schwingkreis mit Induktor (Beispiel)

Mit dieser Induktionsanlage kann eine Sollleistung von bis zu 40 kW bei bis zu 100 kHz realisiert werden. Die Abmessungen des zylindrischen Induktors können Tabelle 3 entnommen werden.

Tabelle 3 Abmessungen des Induktors

<i>Abmessung</i>	<i>Wert</i>
Windungszahl	10
Mittlerer Durchmesser $d_{m,Ind}$	165 mm
Induktordurchmesser d_{Rohr}	8 mm
Wandstärke Rohr s_{Rohr}	2 mm
Höhe des Induktors h_{Ind}	400 mm

4.1.3 Weitere Komponenten

Das Innenrohr der Anlage besteht aus Quarzglas, welches eine Temperaturbeständigkeit bis über 1000 °C aufweist. Das Rohr hat einen Außendurchmesser von 148,5 mm und einen Innendurchmesser von 141,5 mm. Das Quarzglasrohr ermöglicht eine Beobachtung und fotografische Aufnahmen des Erwärmungsprozesses.

Der Rost sowie dessen Halterung bestehen aus nichtrostendem Stahl (V2A). Der Rost ist über die gesamte Fläche mit Bohrungen versehen, die konzentrisch angeordnet sind. Die Halterung besteht aus einer Gewindestange an deren Ende ein Bolzen abgedreht wurde. Auf diesen kann der Rost aufgesteckt werden, was eine leichte Montage und Demontage ermöglicht. Die Gewindestange dient gleichzeitig als Halterung der Thermoelemente zur Messung der Luftaustrittstemperatur.

Mit der Druckluftanbindung können Volumenströme von bis zu 300 m³/h (i.N.) gefahren werden.

Die zu kühlenden Komponenten sind der Induktor und der zugehörige Schwingkreis bzw. das Kompensationsfeld, sowie der Kühler die sich am unteren Ende des Stahlbehälters befindet und ein ausblasen zu heißer Luft in die Versuchsräume verhindert. Alle Komponenten werden mit Wasser aus der Kühlwasseranbindung gekühlt. Bei der Induktionsanlage wird ein konstanter Volumenstrom von 2 l/min verwendet, der eingesetzte Kühler wird mit 30 l/min versorgt.

Der sich vor dem Eintritt der Luft in das Quarzglasrohr befindende Strömungsgleichrichter sorgt einerseits für eine gleichmäßige Strömungsverteilung und dient andererseits als Halterung für die hängende Anordnung der Rundstabkonzepte. Der Gleichrichter weist

eine Dicke von 10 mm auf und ist ähnlich wie der Rost über fast die gesamte Fläche mit konzentrisch angeordneten Bohrungen von 6 mm Durchmesser versehen. Die durchströmte Fläche beträgt 6107,26 mm².

Die Detailzeichnungen des Quarzglasrohres, des Rosts, der Halterung und des Strömungsgleichrichters können dem Anhang entnommen werden.

4.2 Implementierung der Messtechnik

Innerhalb des Versuchsaufbaus werden Messdaten zu Temperatur, Volumenstrom und elektrische Leistungsdaten, wie Stromstärke und Frequenz, aufgezeichnet. Informationen zur eingesetzten Messtechnik und den entsprechenden Messabweichungen sind Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 4 Implementierte Messtechnik

<i>Messgröße</i>	<i>Messgerät</i>	<i>Messbereich</i>	<i>Abweichung</i>
Temperatur Spei- chermedien	Stufenthermoelement / 0,5 mm / Typ K / Kl. 1	-40 °C...1100 °C	$\pm 1,5 \text{ K}$
Temperatur Luftaus- und eintritt Speicher- medium / Kühler, Trägerplatte, Flansch	Thermoelement / 1,5 mm / Typ K / Kl. 1	-40 °C...1100 °C	$\pm 1,5 \text{ K}$
Temperatur Quarz- glasrohr	Thermoelement / 3 mm / Typ K / Kl. 1	-40 °C...1100 °C	$\pm 1,5 \text{ K}$
Temperatur Behälter- innenwand	Thermoelement / 0,25 mm / Typ K / Kl. 1	-40 °C...1100 °C	$\pm 1,5 \text{ K}$
Temperatur Kühlung Induktionsan- lage/Kühler	Widerstandsthermo- meter / PT 100 / Kl. A	-50 °C...600 °C	$\pm 0,15 \text{ K}$
Volumenstrom Druckluft	Massendurchfluss- regler	0...350 m ³ /h (i.N.)	$\pm 0,5 \text{ \% v. Messwert}$
Volumenstrom Küh- lung Induktionsan- lage	Magn.-Induktiver In- line-Durchflussmes- ser	0...25 l/min	$\pm 2 \text{ \% v. Messwert}$
Magnetische Fluss- dichte	Hall-Sensor	0...3 T	3,6 %/°C bei $I = 5 \text{ mA}$
Oberflächentempera- tur Stäbe	Wärmebildkamera	-40 °C...1200 °C	$\pm 1,5 \text{ \% v. Messwert}$

Alle Messstellen und Bauteile der Testanlage sind im Fließschema nach DIN 19227-1 dargestellt, s. Abbildung 16. Das gesamte Fließschema kann dem Anhang entnommen werden. Die Fehlerrechnung erfolgt nach dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz.

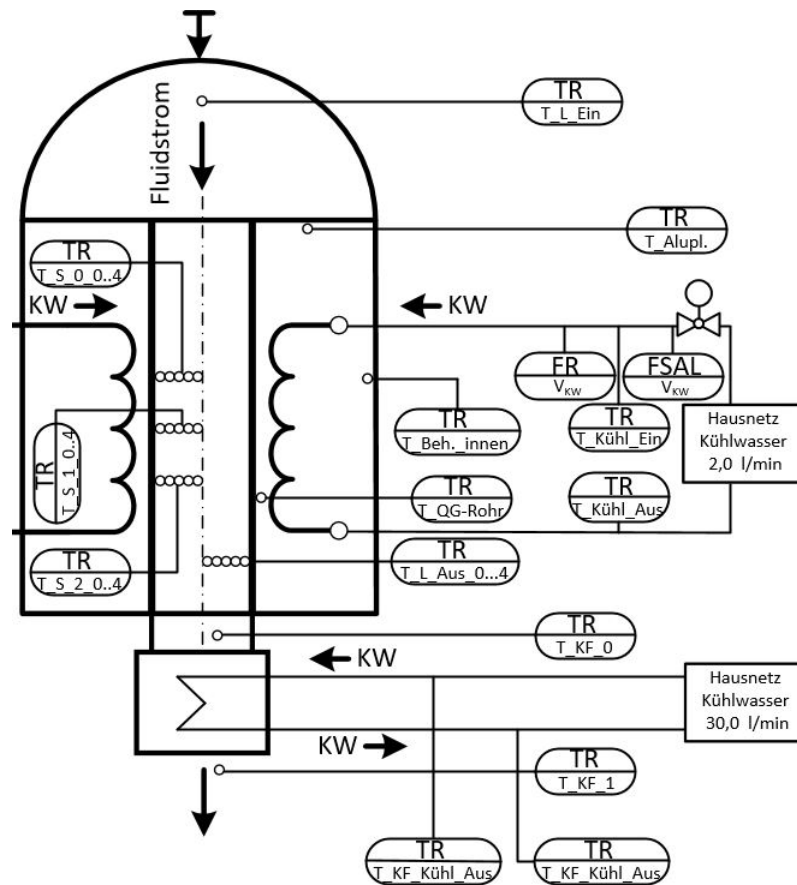


Abbildung 15 Auszug Fließschema Induktionssystem

4.2.1 Temperaturmessung der Speichermedien

Zur Messung der Temperaturen innerhalb der Speichermedien/Schüttungen werden sogenannte Stufenthermoelemente zur Ermittlung eines Temperaturprofils eingesetzt. Die fünf Stufenthermoelemente bestehen aus einem Mantelrohr mit einem Durchmesser von 1,5 mm. Im Inneren dieses Mantelrohres werden jeweils drei einzelne Mantelthermoelemente des Typ-K mit einem Durchmesser von 0,5 mm zu den Messpunkten durchgeführt. Die drei Messpunkte sind von der Spitze des Stufenthermoelements aus gemessen mit einem Abstand von 75 mm zueinander angeordnet, s. Abbildung 15. Da die Stabhöhe 300 mm beträgt, befinden sich die Messpunkte damit in einer Höhe von 75 mm, 150 mm und 225 mm.

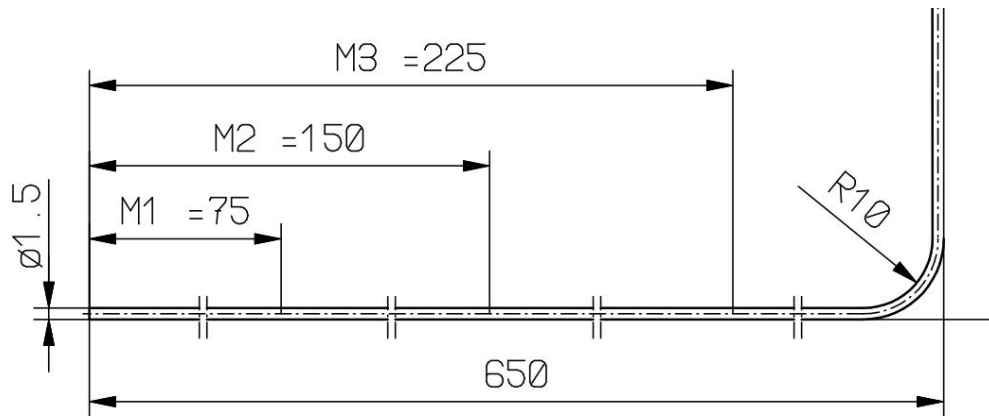


Abbildung 16 Messpunkte Stufenthermoelemente

Die Stufenthermoelemente werden von unten durch das Glasrohr und den Rost hindurchgeführt. Durch den Einsatz von fünf Stufenthermoelementen können in der vertikalen Achse Temperaturen an jeweils drei Stellen gemessen werden. In der horizontalen Achse können Temperaturen auf drei Ebenen und damit radial von innen nach außen an fünf Messpunkten gemessen werden. Die Verteilung und Bezeichnung der Messpunkte kann Abbildung 16 entnommen werden. Für die in Kapitel 4.3.2 vorgestellten Stabanordnungen werden zwei der fünf Stufenthermoelemente am jeweils inneren Stab und an einem der äußeren Stäbe befestigt.

4.2.2 Messung der Luftaustrittstemperatur

Die Luftaustrittstemperatur wird noch innerhalb des Quarzglasrohres in einem Abstand von 40 mm zum Rost gemessen. Dazu sind fünf Thermoelemente, mit einem Durchmesser von 1,5 mm des Typ-K/Klasse 1, radial von der Rohrachse hin zur Rohrwand angeordnet. Die Anordnung ist logarithmisch gewählt, da zur Rohrwand hin eine starke Zunahme der Luftaustrittstemperatur im Vergleich zur Rohrmitte erwartet wird.

4.2.3 Weitere Messstellen

Weitere Messstellen befinden sich im Vor- und Rücklauf der Induktorkühlung und im Lufteintritt. Die hier ermittelten Messwerte dienen der Berechnung der Wärmeverluste des Induktors und des thermischen Wirkungsgrades. Die Temperaturmessungen an der Spule, am Glasrohr und an der Innenseite des Behälters werden für weitere Wärmebilanzierungen herangezogen. Alle weiteren Messstellen dienen der Anlagensicherheit, um bei

einer eventuellen Störung die Anlage abzuschalten. So werden etwa die Luftaus- und Luft Eintrittstemperatur des Kühlers gemessen. Der verwendete Lamellenwärmetauscher sollte für einen funktionssicheren Betrieb nicht über längere Zeit bei mehr als 220 °C betrieben werden. Die Temperatur des Flansches, durch den der Induktor hindurchgeführt wird, ist ebenfalls in die Sicherheitskette eingeschlossen.

4.3 Versuchsvorbereitung

Für die durchzuführenden experimentellen Untersuchungen wird zunächst der Stabdurchmesser ausgewählt werden. Dieser bestimmt die umsetzbaren Anordnungen von denen vier, mit unterschiedlichen Packungsdichten, ausgewählt werden. Weiterhin werden die Prozessparameter zu induzierten Wirkleistungen und Volumenströmen für die experimentellen Untersuchungen festgelegt. Die Höhe der Stabanordnungen wird auf 300 mm festgelegt.

4.3.1 Auswahl des Stabdurchmessers

Für die Auswahl des Stabdurchmessers wird Abbildung 17 herangezogen. Diese zeigt den Anteil P der induzierten Wirkleistung im Werkstück P in Abhängigkeit des Parameters x_2 . Dieser ergibt sich aus dem Stabdurchmesser D_w und der Stromeindringtiefe δ . Die Stromeindringtiefe kann aus der Frequenz f , dem spezifischen elektrischen Widerstand ρ und der Permeabilität μ berechnet werden:

$$\delta = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \quad \text{in mm}$$

Die Induktionsversuche werden mit Frequenzen im Bereich von 20-25 kHz durchgeführt. Bei einer angenommenen Stabtemperatur von 600 °C, einer Frequenz von 20 kHz, einem spezifischen elektrischen Widerstand von 0,2 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ und einer Permeabilität von 40, wird eine Stromeindringtiefe von etwa 0,25 mm errechnet. Wird weiterhin für den Parameter x_2 ein Wert von 100 gewählt, so ergibt sich ein Durchmesser von etwa 35 mm. Für die experimentellen Untersuchungen werden Stäbe mit einem Durchmesser von 30 mm verwendet.

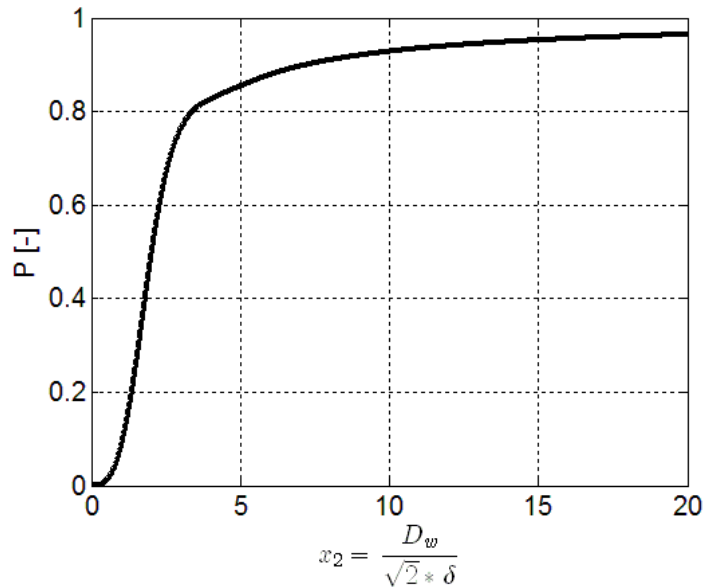


Abbildung 17 Optimale Leistungsabsorption in Abhängigkeit von x_2

4.3.2 Anordnung der Stäbe

Die in Kapitel 3 aufgestellte These einer Effizienzsteigerung durch die Erhöhung der Stabanzahl soll durch die Anordnung von 5, 7, 9 und 16 Stäben überprüft werden. Es werden dabei Packungsdichten von 23, 32, 41 und 72 % erreicht. Eine symmetrische Anordnung der Stäbe soll eine gleichmäßige Strömungsverteilung gewährleisten. Hierfür sind die Rundstäbe mit einer M5 Gewindebohrung versehen. In diese wird eine M5 Gewindestange hineingedreht die dann am Strömungsgleichrichter befestigt wird. Die einzelnen Stäbe werden so hängend montiert und an den Lochkreisen des Strömungsgleichrichters gleichmäßig verteilt. Um die größtmögliche Packungsdichte zu erzielen, wird auf eine hängende Montage verzichtet werden. Der Rost dient hier als Halterung. Die nachfolgenden Abbildungen 18, 19, 20 und 21 zeigen die gewählten Anordnungen der Rundstäbe.

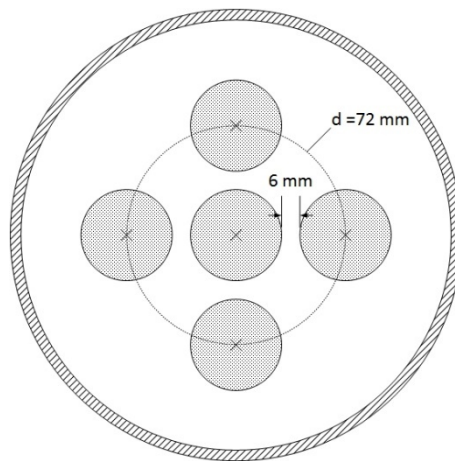


Abbildung 18 Anordnung mit 5 Stäben

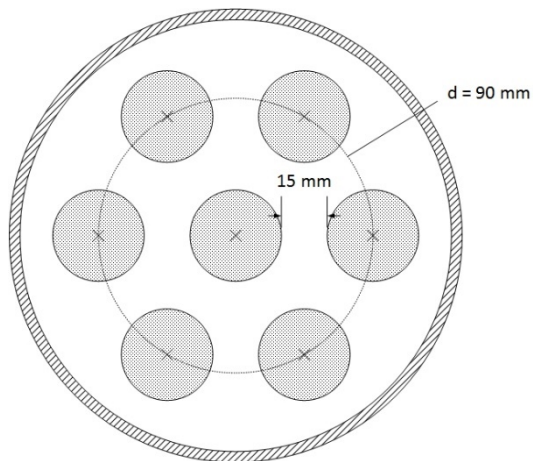


Abbildung 19 Anordnung mit 7 Stäben

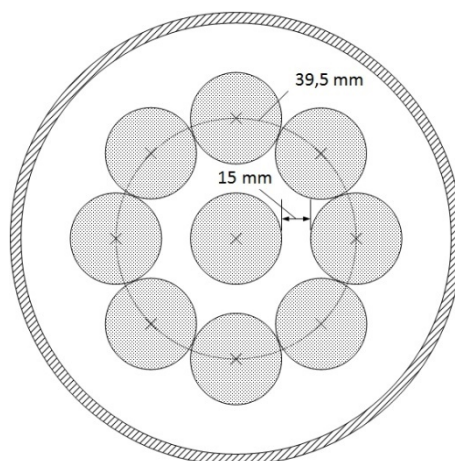


Abbildung 20 Anordnung mit 9 Stäben

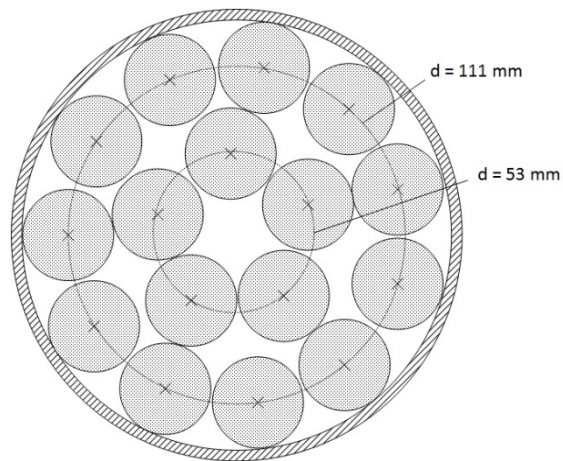


Abbildung 21 Anordnung mit 16 Stäben

4.3.3 Prozessparameter

Die vier gewählten Anordnungen werden jeweils bei Wirkleistungen von 5 und 10 kW am Generator und Normvolumenströmen von 25, 50, 75 und 100 m³/h (i.N.) untersucht. Hierbei werden Stromstärken und Frequenzen von annähernd 100 A, respektive 32 kHz erreicht. Der Volumenstrom des Kühlwassers der Induktionsanlage beträgt konstant 0,12 m³/h. Die Stabanordnungen werden solange erwärmt bis der stationäre Zustand erreicht ist.

4.4 Versuchsdurchführung

Ziel der Versuchsdurchführung ist die Ermittlung von Daten zur Berechnung des Gesamtwirkungsgrades für die vier gewählten Anordnungen. Zunächst werden eine Feldvermessung und eine thermische Vermessung des Rostes ohne die Integration der Stabanordnungen durchgeführt. So können bei der Versuchsauswertung Rückschlüsse auf die Erwärmung der Stäbe, durch eventuell auftretende Einflüsse einer Feldinhomogenität und einer Erwärmung des Rostes, gezogen werden. Zudem wird eine thermografische Vermessung durchgeführt um die Auswirkungen einer möglichen Feldinhomogenität auf die damit resultierende Ausbildung lokaler Erwärmungszonen zu untersuchen.

4.4.1 Feldvermessung

Das magnetische Feld innerhalb des Induktors wird mit Hilfe eines Hall-Sensors vermessen. Die Ausgangsspannung (Hall-Spannung) des Sensors ist dabei proportional zur magnetischen Feldstärke (Hall-Effekt). Gemessen wird die Hall-Spannung in mV. Abbildung 22 zeigt die Verteilung der Messpunkte. Diese sind auf drei vertikale und zehn horizontale Achsen verteilt. Die Vermessung des magnetischen Feldes erfolgt ohne Speicherinventar und Rost bei einer Generatorleistung von 20 kW und einer Frequenz von 98 kHz.

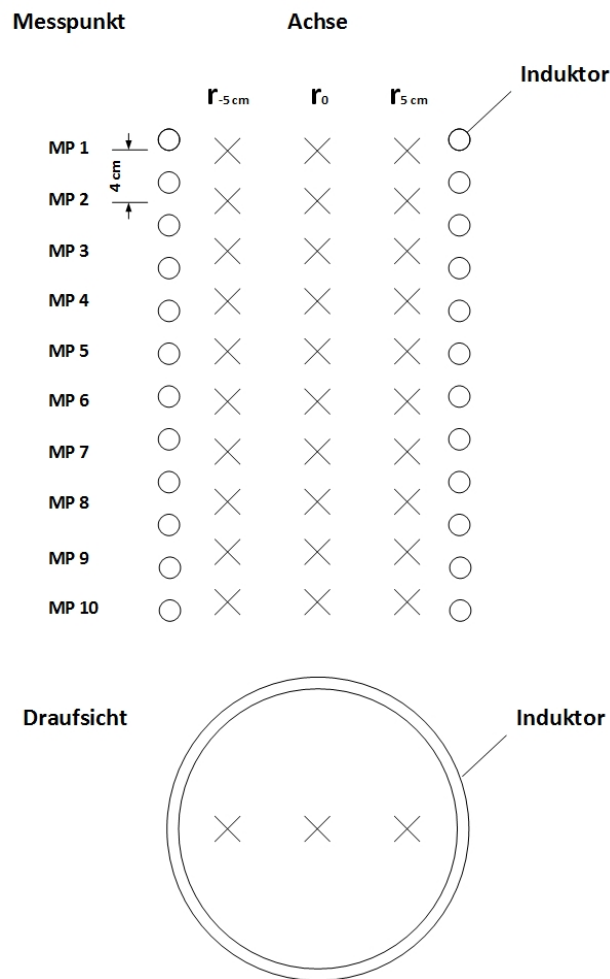


Abbildung 22 Messpunkte Feldvermessung

4.4.2 Thermische Vermessung des Rostes

Die auftretenden Temperaturen sollen bei einer Generatorleistung von 10 kW, wie Abbildung 23 zeigt, durch drei Messpunkte an der Oberfläche des Rostes, sowie einem

Messpunkt an dessen Halterung, ermittelt werden. Da der Rost sich innerhalb des Spulenbereichs befindet, ist eine Erwärmung des selbigen zu erwarten. Der Rost soll daher bis zum stationären Zustand erwärmt werden.

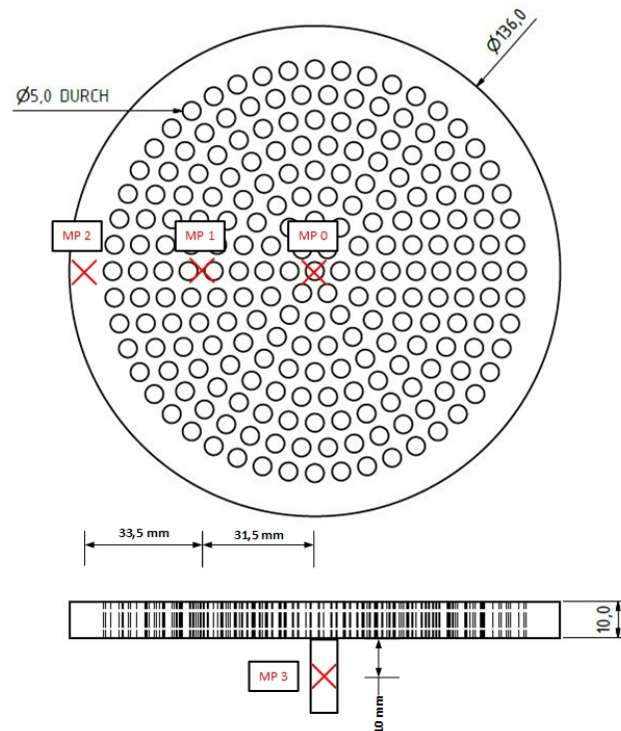


Abbildung 23 Messpunkte Rost und Halterung

4.4.3 Thermografische Vermessung

Um den Erwärmungsprozess der Stäbe abzubilden wird die Wärmebildkamera VariacAM® der Fa. InfraTec eingesetzt. Diese zeichnet in Abständen von 10 Sekunden die Temperaturen der Stabanordnung mit fünf Stäben bei einer Generatorleistung von 10 kW auf, bis Temperaturen von etwa 600 °C erreicht sind. Die Aufnahmen können anschließend als Falschfarben-Bilder betrachtet werden. Abbildung 24 zeigt den Aufbau der thermografischen Vermessung. Die Aufnahmen werden ohne Quarzglasrohr und damit ohne eine Durchströmung durchgeführt. Eine Abkühlung der Stäbe durch den Luftstrom, besonders im oberen Bereich, und eine damit verbundene Verfälschung der aufgenommenen Temperaturwerte wird somit verhindert. Zudem wäre eine Aufnahme der Temperaturen aufgrund der Strahlungsabsorption des Quarzglasrohres nicht möglich.

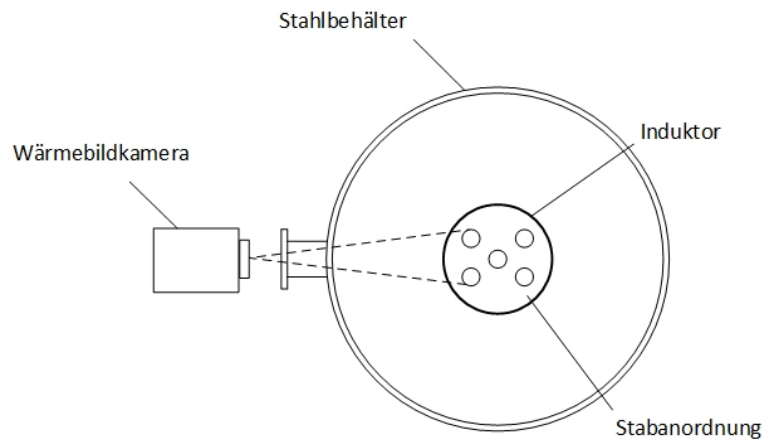


Abbildung 24 Versuchsanordnung der thermografischen Vermessung

4.4.4 Thermische Vermessung der Stabanordnungen

Eine Temperaturmessung der Stabordnungen erfolgt mit Hilfe der in Kapitel 4.2.1 bereits erwähnten Stufenthermoelemente. Gemessen wird die Oberflächentemperatur an drei Messebenen. Die Stufenthermoelemente werden entlang der Stäbe durch Nickelfolie an deren Oberfläche positioniert, s. Abbildung 25. Bei jeder der vier Anordnungen werden die Oberflächentemperaturen des mittleren Stabes, sowie eines äußeren Stabes gemessen. Dafür kommen die Stufenthermoelemente der Achse 0 und 3 zum Einsatz.

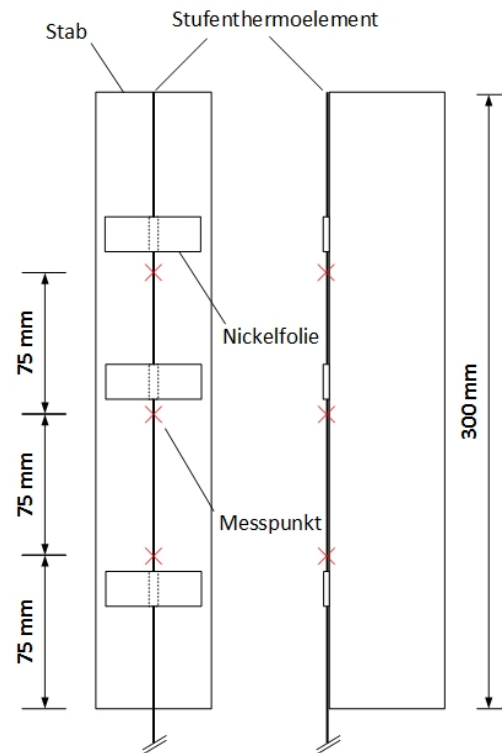


Abbildung 25 Platzierung der Stufenthermoelemente am Stab

4.4.5 Thermische Vermessung der Luftaus- und Lufteintrittstemperatur

Die Lufteintrittstemperatur wird mittig innerhalb des Deckels des Stahlbehälters gemessen, s. Abbildung 26. Hierfür wird ein Thermoelement mit dem Durchmesser 1,5 mm des Typ-K/Klasse 1 verwendet.

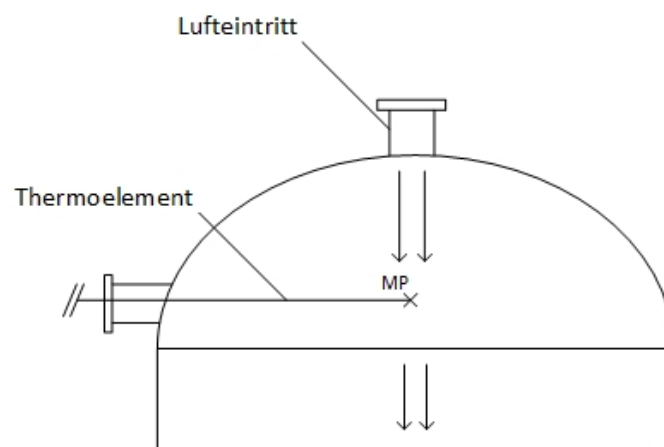


Abbildung 26 Anordnung Thermoelement Lufteintritt

Die Verteilung der Thermoelemente zur Messung der Luftaustrittstemperatur ist Abbildung 27 zu entnehmen.

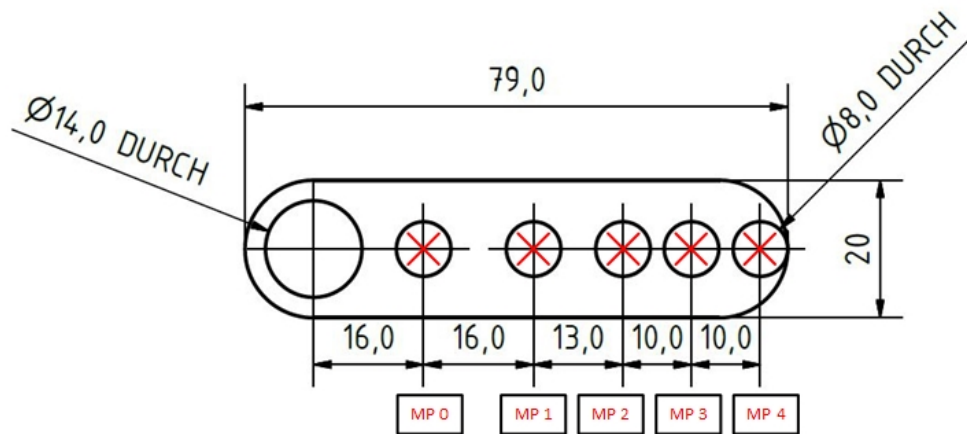


Abbildung 27 Messpunkte Luftaustrittstemperatur

4.5 Versuchsauswertung

Die während der Versuchsdurchführung ermittelten Messwerte, sowie Beobachtungen werden in diesem Kapitel vorgestellt, ausgewertet und diskutiert. Im Fokus steht die Überprüfung der These einer Zunahme der induzierten Leistung durch die Erhöhung der Stabanzahl innerhalb des Induktors und eine damit verbundene Steigerung des thermischen und elektrischen Wirkungsgrades. Anschließend erfolgt eine technische Bewertung des getesteten Konzepts in Bezug auf einen Einsatz im kraftwerkstechnischen Maßstab.

4.5.1 Auswirkungen der Feldhomogenität

Das vermessene magnetische Feld zeigt eine deutliche Inhomogenität. Die Mittelwerte der gemessenen Ausgangsspannungen und damit auch die Feldstärken variieren stark, s. Tabelle 5. Entlang der mittleren Achse r_0 wäre eigentlich die größte Feldstärke zu erwarten. Diese herrscht allerdings entlang Achse r_5 cm.

Tabelle 5 Messwerte der Feldvermessung

<i>Messpunkt</i>	<i>r-5 cm</i>	<i>r₀</i>	<i>r5 cm</i>
1	48,0 mV	58,4 mV	52,5 mV
2	51,0 mV	48,8 mV	59,3 mV
3	47,3 mV	50,9 mV	64,9 mV
4	50,2 mV	41,2 mV	63,7 mV
5	50,4 mV	37,7 mV	63,5 mV
6	52,1 mV	39,1 mV	64,1 mV
7	47,4 mV	44,9 mV	65,4 mV
8	51,7 mV	44,6 mV	68,7 mV
9	52,3 mV	49,6 mV	65,7 mV
10	50,6 mV	48,7 mV	67,1 mV

Die starken Schwankungen der magnetischen Feldstärke haben einen Einfluss auf die Erwärmung der Stäbe. Dies ist auf den Zusammenhang zwischen der magnetischen Feldstärke H , der magnetischen Flussdichte B und dem magnetischen Fluss Φ zurückzuführen. Bei den zu testenden Stabanordnungen ist daher mit einem inhomogenen Temperaturprofil zu rechnen.

4.5.2 Einfluss des Rostes

Mit der vorhandenen Induktionsanlage war die Erzielung einer Generatorleistung von 10 kW nicht möglich. Es konnte lediglich eine Wirkleistung von 8,1 kW erzielt werden. Der hohe Blindleistungsanteil ist vor allem auf das austenitische Gefüge des Edelstahlrostes (V2A) zurückzuführen. Eine induktive Erwärmung eines solchen Werkstoffs ist damit nur schwer möglich. Tabelle 6 zeigt die erzielten Temperaturen im stationären Zustand.

Tabelle 6 Messwerte Rost und Halterung

<i>Messpunkt</i>	<i>Messwert</i>
0	269,0 °C
1	302,9 °C
2	487,0 °C
3	113,1 °C

Die erzielten Temperaturen an den Messpunkten 0, 1 und 3 sind vermutlich zum größten Teil auf die Wärmeleitung des Rostes zurückzuführen. Der Einfluss des Rostes auf die Erwärmung der Stäbe kann aufgrund der mangelnden Feldeinkopplung und der deutlich höheren thermischen Masse der Stäbe als vernachlässigbar angesehen werden.

4.5.3 IR-Aufnahmen

Die Aufnahmen der Wärmebildkamera zeigen eindeutig eine unregelmäßige Erwärmung der einzelnen Stäbe innerhalb der Anordnung. Die Abbildung 28-Abbildung 32 zeigen die Oberflächentemperaturen nach 60, 180, 300, 420 und 540 s. Zu erkennen ist, dass der sich im Vordergrund auf der rechten Seite befindliche Stab deutlich schneller erwärmt als die anderen Stäbe. Mit zunehmender Erwärmung gleichen sich die Temperaturen aufgrund der gegenseitigen Wärmetransportmechanismen nach und nach an. In der Mitte der Stäbe befindet sich die Erwärmungszone mit den höchsten Manteltemperaturen. Die punktuellen Erwärmungszonen sind auf die Zunderschicht und deren, sich von der zunderfreien Staboberfläche unterscheidenden, Emissionskoeffizient zurückzuführen.

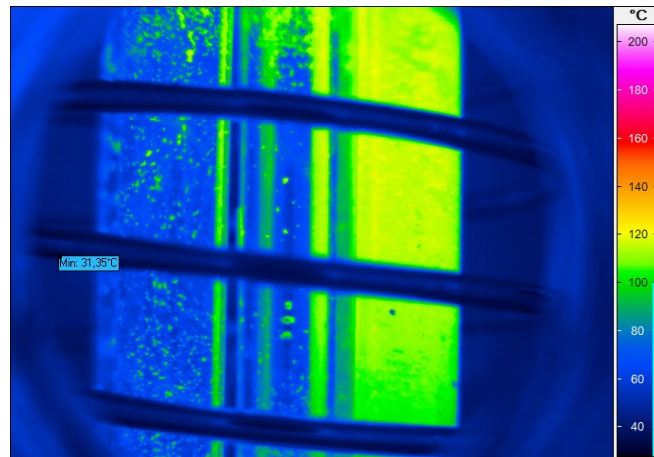


Abbildung 28 IR-Aufnahme nach 60 s

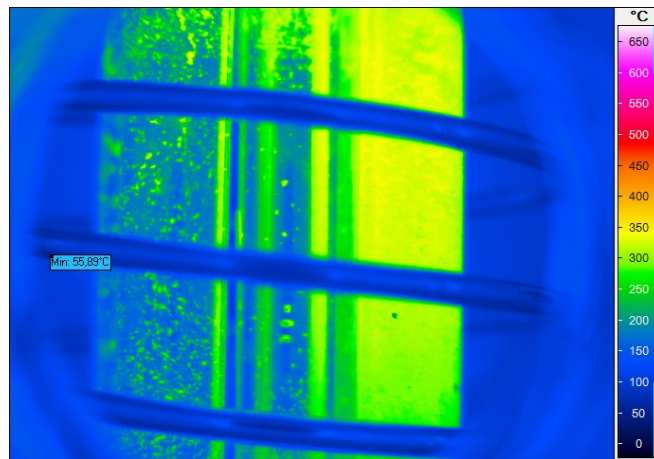


Abbildung 29 IR-Aufnahme nach 180 s

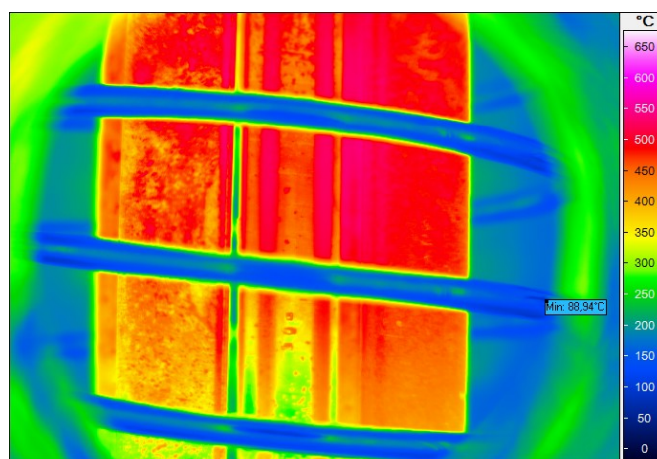


Abbildung 30 IR-Aufnahme nach 300 s

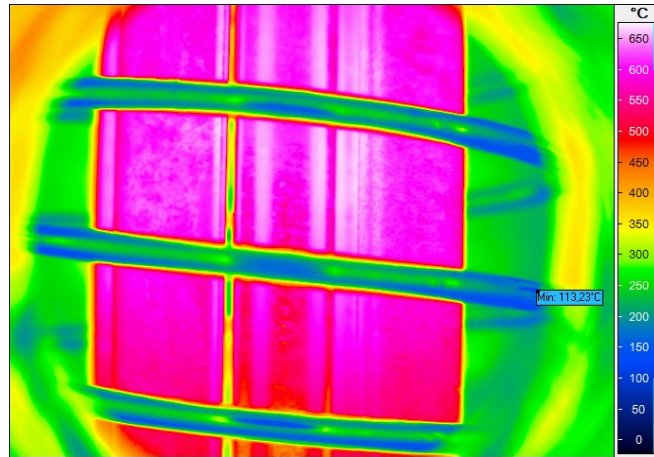


Abbildung 31 IR-Aufnahme nach 420 s

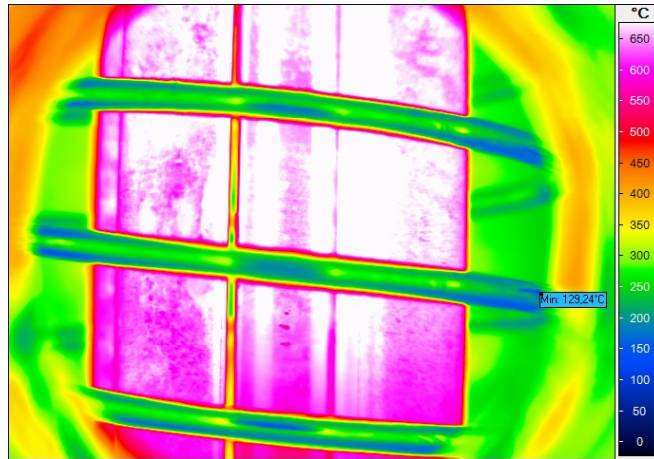


Abbildung 32 IR-Aufnahme nach 540 s

Die Annahme einer inhomogenen Erwärmung und die Ausbildung lokaler Erwärmungszonen aufgrund der gemessenen Feldinhomogenität wird damit bestätigt.

4.5.4 Berechnung des elektrischen Wirkungsgrades

Der elektrische Wirkungsgrad η_{el} kann näherungsweise aus dem Verhältnis der in den Stäben induzierten Leistung P_{ind} und der Summe P_0 aus induzierter Leistung und den Wärmeverlusten der Spule P_{Sp} berechnet werden:

$$\eta_{el} = \frac{P_{ind}}{P_0}$$

mit

$$P_0 = P_{ind} + P_{Sp}$$

Bei einer Generatorleistung von 5 kW ergeben sich für die Stabanordnung mit 16 Stäben die höchsten Wirkungsgrade, s. Abbildung 33. Die Anordnung mit 5 Stäben weist deutlich die niedrigsten Wirkungsgrade auf. Mit steigendem Volumenstrom ist eine eindeutige Erhöhung der elektrischen Wirkungsgrade erkennbar.

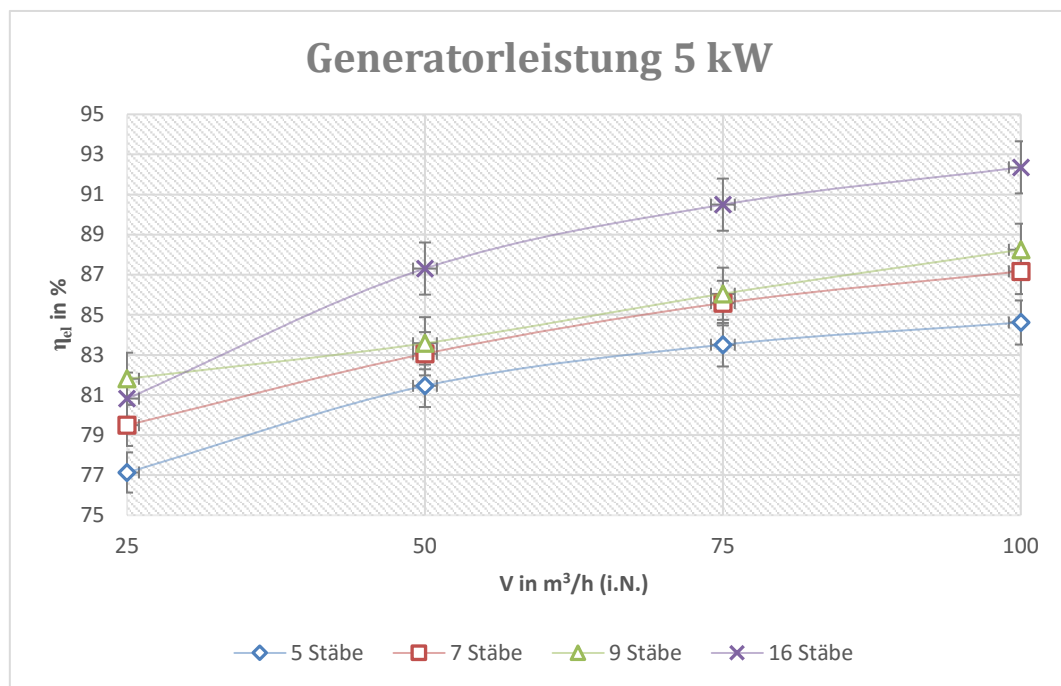


Abbildung 33 Elektrische Wirkungsgrade bei 5 kW

Analog sind die Messergebnisse bei einer Generatorleistung von 10 kW, s. Abbildung 34. Die Anordnungen mit 9 und 7 Stäben weisen eine ähnliche Größenordnung des elektrischen Wirkungsgrades auf. Die Anordnung mit 16 Stäben erzielt mit Abstand die höchsten Wirkungsgrade, die Anordnung mit 5 Stäben die niedrigsten.

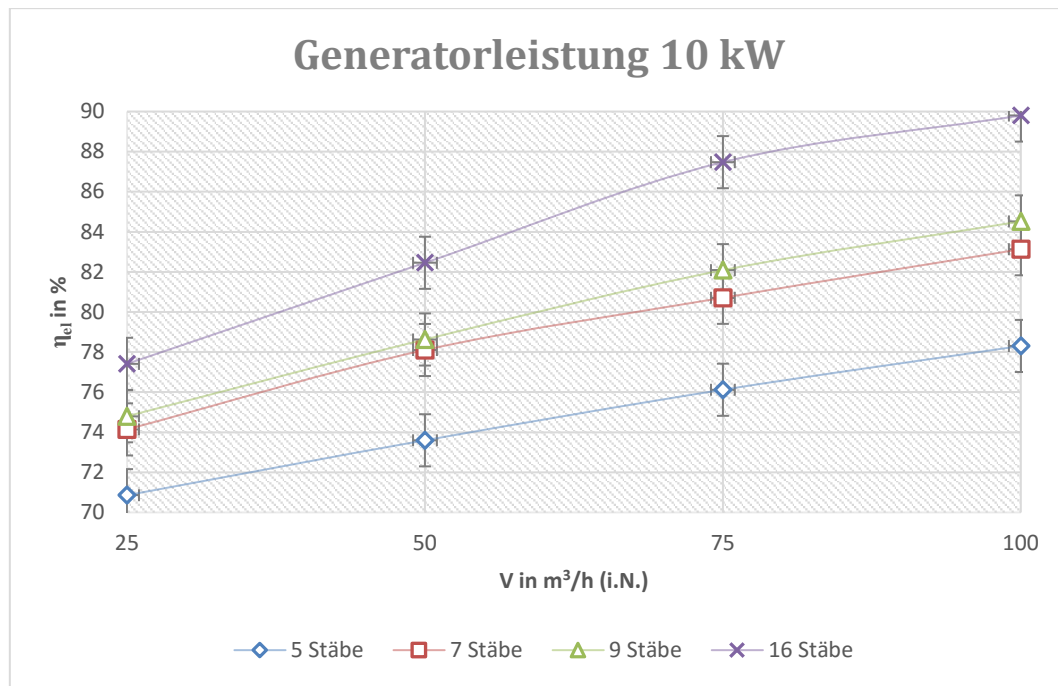


Abbildung 34 Elektrische Wirkungsgrade bei 10 kW

Die Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades mit zunehmendem Volumenstrom kann auf die niedrigeren Stabtemperaturen zurückgeführt werden, welche aus einer besseren konvektiven Wärmeübertragung resultieren. Mit einem abnehmenden Volumenstrom nimmt der Wirkleistungsanteil aufgrund steigender Stabtemperaturen ab. Aufgrund des niedrigeren Volumenstroms verschlechtert sich die konvektive Wärmeübertragung gegenüber dem höheren Volumenstrom. Das für die Reduzierung des Blindleistungsanteils zuständige Kompensationsfeld ist aufgrund seiner erhöhten Erwärmung mit einem zugleich steigenden Kühlaufwand verbunden, was an der Erhöhung der Kühlleistung P_{Sp} sichtbar wird.

4.5.5 Berechnung der mittleren Luftaustrittstemperatur

Eine Möglichkeit zur Bestimmung der mittleren Luftaustrittstemperatur besteht darin, die gemessenen Temperaturen auf den durch die Luft transportierten Wärmestrom zu beziehen. Dieser kann mit Hilfe der Dichte ρ , der Strömungsgeschwindigkeit w im Flächenelement dA und der spezifischen Wärmekapazität c_p berechnet werden. Zusammen mit den gemessenen Temperaturen ergibt sich die mittlere Luftaustrittstemperatur ϑ_m somit zu:

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta_1 \cdot \rho_1 \cdot c_{p1} \cdot w_1 \cdot dA_1 + \dots + \vartheta_n \cdot \rho_n \cdot c_{pn} \cdot w_n \cdot dA_n}{\rho_1 \cdot c_{p1} \cdot w_1 \cdot dA_1 + \dots + \rho_n \cdot c_{pn} \cdot w_n \cdot dA_n}$$

Da in diesem Fall die Geschwindigkeiten über den Rohrquerschnitt nicht gemessen wurden, kann bei Annahme einer mittleren Geschwindigkeit über den Rohrquerschnitt die Geschwindigkeitskomponente vernachlässigt werden:

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta_1 \cdot \rho_1 \cdot c_{p1} \cdot dA_1 + \dots + \vartheta_n \cdot \rho_n \cdot c_{pn} \cdot dA_n}{\rho_1 \cdot c_{p1} \cdot dA_1 + \dots + \rho_n \cdot c_{pn} \cdot dA_n}$$

Die Werte für Dichte, Wärmekapazität und der Flächen können dem Anhang entnommen werden.

Für eine Generatorleistung von 5 kW weist die Stabanordnungen mit 16 Stäben die mit Abstand höchsten mittleren Luftaustrittstemperaturen auf, s. Abbildung 35. Die Anordnung mit 9 Stäben liegt etwa gleich auf, die mit 7 Stäben liegt etwas darunter. Die niedrigsten Temperaturen wurden mit 5 Stäben gemessen.

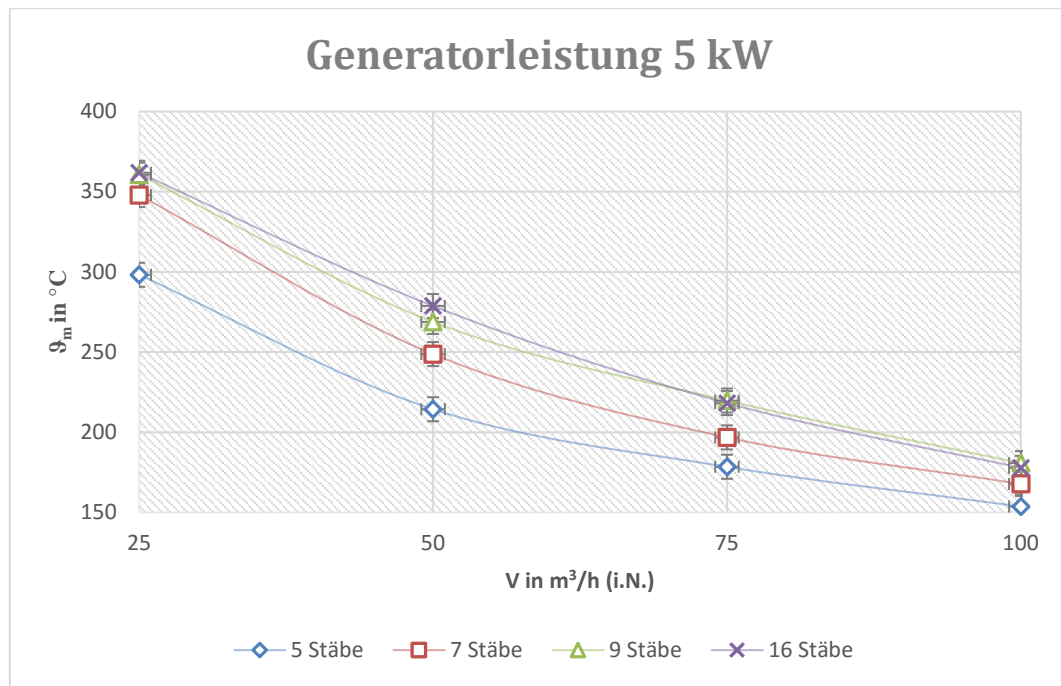


Abbildung 35 Mittlere Luftaustrittstemperaturen bei 5 kW

Bei einer induzierten Wirkleistung von 10 kW werden mit der Anordnung von 16 Stäben mit Abstand die höchsten Luftaustrittstemperaturen erzielt, s. Abbildung 36. Die Anordnung mit 9 Stäben weist leicht höhere Werte als die mit 7 Stäben auf. Die Anordnung mit 5 Stäben weist wieder die niedrigsten Werte auf.

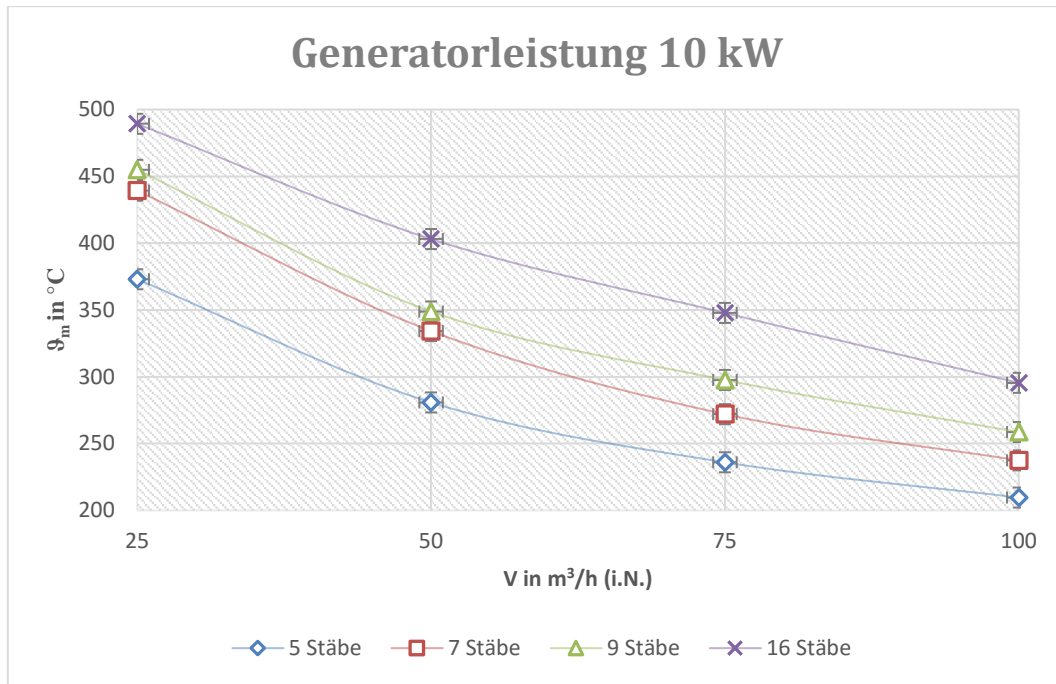


Abbildung 36 Mittlere Luftaustrittstemperaturen bei 10 kW

Mit einer Zunahme des Volumenstroms sinkt erwartungsgemäß die Luftaustrittstemperatur, da aufgrund des höheren Massenstroms und den damit höheren Strömungsgeschwindigkeiten ein besserer Wärmeübergang zwischen den Stäben und der Luft stattfindet.

4.5.6 Berechnung des Thermischen Wirkungsgrades

Der thermische Wirkungsgrad η_{th} kann aus dem Verhältnis der thermischen Leistung der erwärmten Luft P_{th} und der induzierten Leistung P_{ind} berechnet werden.

$$\eta_{th} = \frac{P_{th}}{P_{ind}}$$

Die thermische Leistung P_{th} wird mit Hilfe der Strömungsgeschwindigkeit w , der spez. Wärmekapazität c_p , der Rohrquerschnittsfläche A , der Dichte ρ , der mittleren Luftaustrittstemperatur ϑ_m und der Lufteintrittstemperatur ϑ_{ein} berechnet:

$$P_{th} = \rho \cdot w \cdot A \cdot c_p \cdot (\vartheta_m - \vartheta_{ein})$$

Abbildung 37 zeigt thermische Wirkungsgrade bei einer Generatorleistung von 5 kW. Zu erkennen ist, dass bei dieser Leistung die Anordnungen mit 16 und 9 Stäben nahezu die gleichen thermischen Wirkungsgrade aufweisen. Etwas niedriger sind die der Anordnung mit 7 Stäben. Mit der Anordnung von 5 Stäben werden die niedrigsten Werte erzielt. Bei einem Normvolumenstrom von 25 m³/h liegen die Wirkungsgrade nah beieinander. Durch eine Erhöhung des Normvolumenstroms steigen ebenso die thermischen Wirkungsgrade.

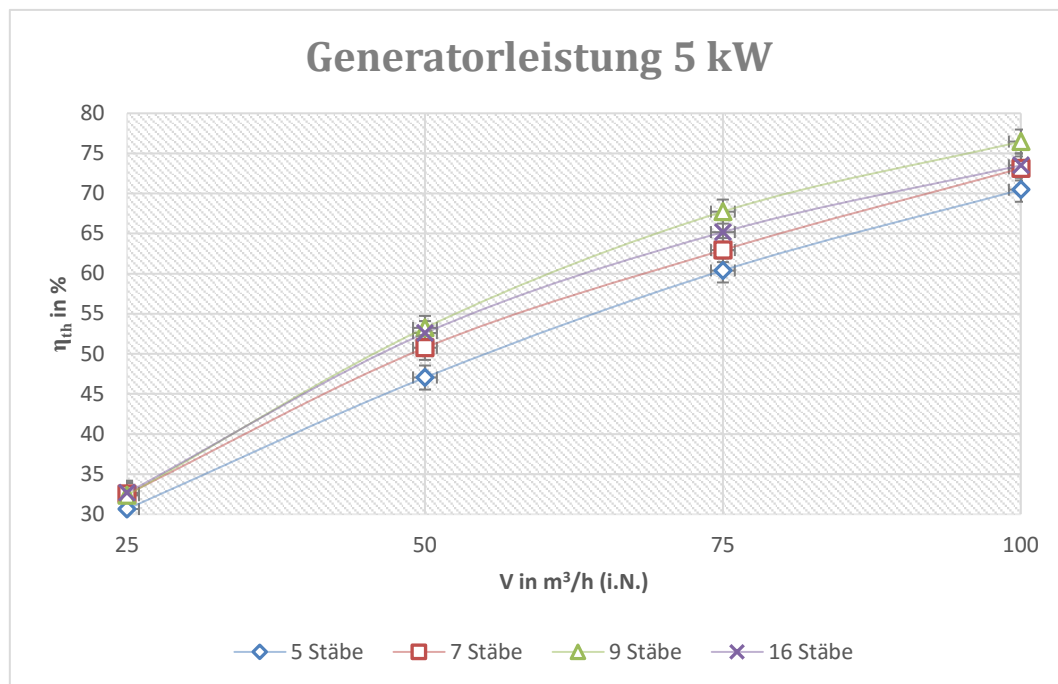


Abbildung 37 Thermische Wirkungsgrade bei 5 kW

Die thermischen Wirkungsgrade bei einer Generatorleistung von 10 kW und einem Normvolumenstrom von 25 m³/h zeigen einen analogen Verlauf zu der mit 5 kW, s. Abbildung 38. Mit einer Zunahme des Normvolumenstroms erhöht sich erwartungsgemäß der thermische Wirkungsgrad. Die Anordnung mit 16 Stäben setzt sich mit zunehmendem Volumenstrom von den anderen Anordnungen ab. Die Anordnungen mit 9 und 7 Stäben weisen ähnliche Werte auf, die bei einem zunehmenden Volumenstrom jedoch eine größere Differenz aufweisen. Geringste Wirkungsgrade treten bei der Anordnung mit 5 Stäben auf.

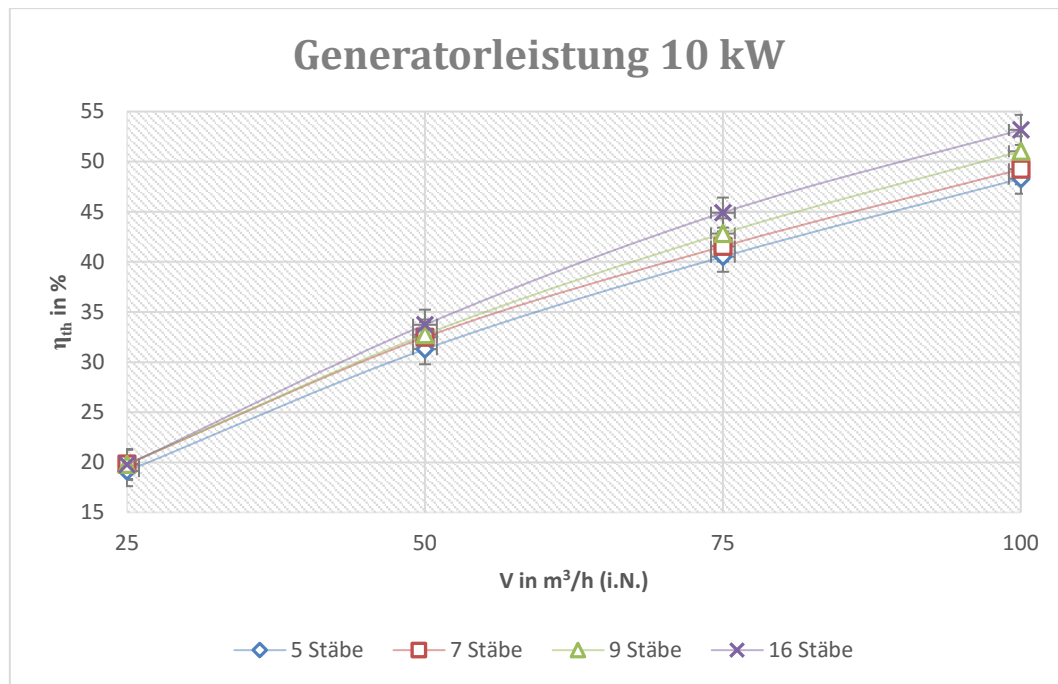


Abbildung 38 Thermische Wirkungsgrade bei 10 kW

Die gemessenen Werte zeigen bei beiden Generatorleistungen, dass trotz einer Abkühlung der Stäbe, durch einen erhöhten Massenstrom, der thermische Wirkungsgrad steigt. Dies ist auf den bereits in Kapitel 4.5.5 beschriebenen besseren Wärmeübergang zwischen Stäben und Luft, aufgrund steigender Strömungsgeschwindigkeiten, zurückzuführen. Daraus resultiert schlussendlich eine Erhöhung der thermischen Leistung P_{th} .

Aus dem Produkt des elektrischen und des thermischen Wirkungsgrads wird der Gesamtwirkungsgrad der Anlage berechnet. Abbildung 39 zeigt die Gesamtwirkungsgrade bei einer Generatorleistung von 5 kW. Die Gesamtwirkungsgrade liegen bei einem Volumenstrom von 25 m³/h (i.N.) nah beieinander. Erst mit zunehmendem Volumenstrom variieren die erzielten Gesamtwirkungsgrade deutlich. Die Anordnung mit 16 Stäben erzielt die höchsten, die Anordnung mit 5 Stäben die niedrigsten Gesamtwirkungsgrade.

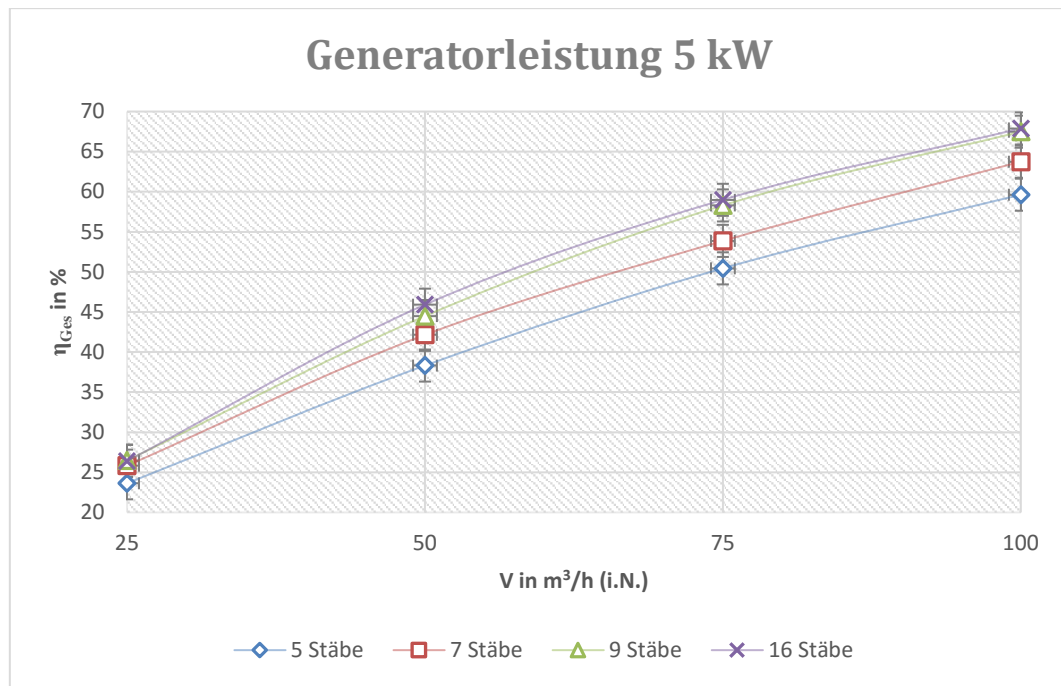


Abbildung 39 Gesamtwirkungsgrade bei 5 kW

Abbildung 40 zeigt die erzielten Gesamtwirkungsgrade bei einer Generatorleistung von 10 kW. Mit zunehmendem Volumenstrom setzt sich die Anordnung mit 16 Stäben deutlich von den anderen Anordnungen ab. Beim kleinsten Volumenstrom von 25 m³/h (i.N.) liegen die Gesamtwirkungsgrade der Anordnungen nah beieinander und weisen bei zunehmendem Volumenstrom eine größere Differenz zueinander auf. Analog zu den Ergebnissen bei der Generatorleistung von 5 kW weist die Anordnung mit der geringsten Packungsdichte (5 Stäbe) die niedrigsten, die Anordnung mit der höchsten Packungsdichte (16 Stäbe) die höchsten Wirkungsgrade auf. Diese Steigerung des Gesamtwirkungsgrades resultiert auf der elektrischen Seite aus der Erhöhung des ohmschen Widerstandes und auf der thermischen Seite aus der Zunahme der wärmeübertragenden Mantelfläche bei steigender Stabanzahl.

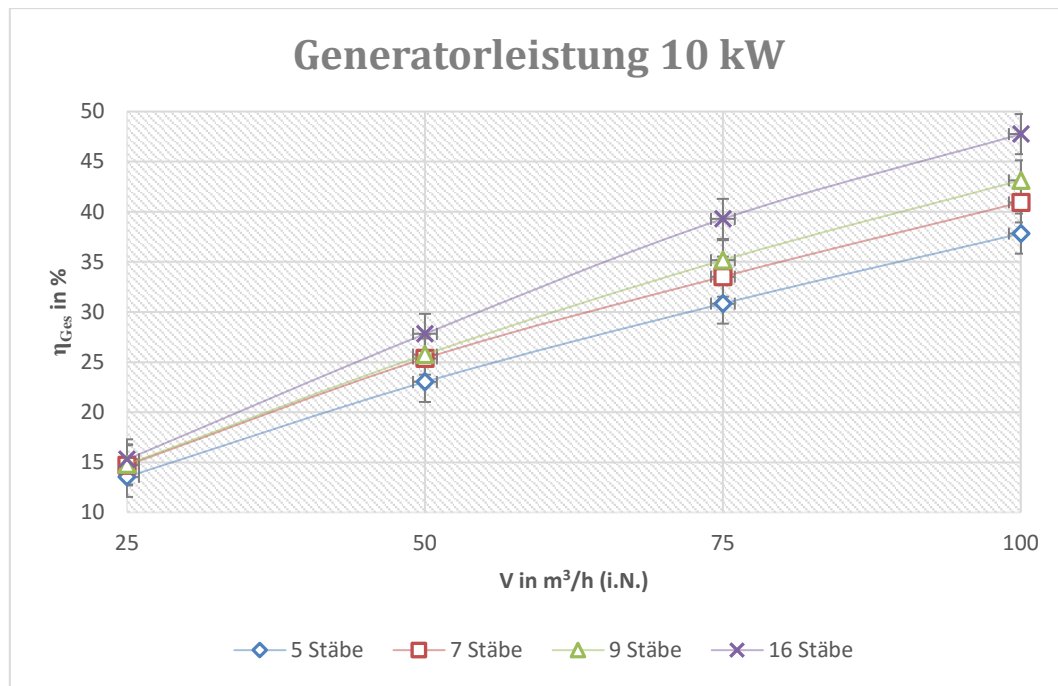


Abbildung 40 Gesamtwirkungsgrade bei 10 kW

4.6 Fazit der experimentellen Untersuchung

Bei der Betrachtung der Gesamtwirkungsgrade wird der Skalierungseffekt basierend auf der steigenden Stabanzahl nochmals deutlich. Die Steigerung des ohmschen Widerstandes auf der elektrischen und die Steigerung der Manteloberfläche der Stäbe auf der thermischen Seite führen zu einer besseren Leistungsübertragung vom Induktor über die einzelnen Stäbe hinweg auf den Luftstrom. Somit steigt der Gesamtwirkungsgrad mit zunehmender Stabanzahl. Zudem wird durch die Erhöhung des Volumenstroms und der damit einhergehenden, höheren konvektiven Leistungsübertragung der Gesamtwirkungsgrad nochmals gesteigert.

Anhand der experimentellen Ergebnisse konnten die in Kapitel 3 aufgestellten Thesen zur Erhöhung der Energieeffizienz aufgrund des geometrischen Skalierungseffekts der Stäbe bewiesen werden. Dabei konnten mit der dichtesten Anordnung von 16 Stäben thermische Wirkungsgrade von annähernd 70 % und elektrische Wirkungsgrade von über 90 % erzielt werden. Mit einer zunehmenden Generatorleistung sinkt jedoch der thermische Wirkungsgrad, da die Wärmeleistung nicht proportional zur Generatorleistung zunimmt. Dies hat schlussendlich Auswirkungen auf den Gesamtwirkungsgrad des Induktionssystems, der mit steigender Generatorleistung abnimmt. Der erzielte Temperaturgradient zwischen Luftaus- und Lufteintrittstemperatur, bei einer Generatorleistung von 10 kW und dem für

die Modellanlage entscheidenden Volumenstrom von $100 \text{ m}^3/\text{h}$ (i.N.), erfüllt diese an das Induktionssystem gestellte Anforderung. Somit ist der Einsatz des Stabkonzepts zur Beladung eines sensiblen Wärmespeichers im Kraftwerksmaßstab denkbar. Bei der Steigerung des Gesamtwirkungsgrades, sowohl auf der elektrischen als auch auf der thermischen Seite, besteht noch Optimierungspotential. Dies könnte durch eine Variation der Geometrie- oder Prozessparameter, wie beispielweise des Stabdurchmessers, des Luftvolumenstroms oder der Frequenz erfolgen.

Weiterhin konnte die vermutete Einflussnahme der gemessenen Feldinhomogenität, auf den Erwärmungsverlauf der Stäbe, anhand der thermografischen Vermessung bestätigt werden. Eine Einflussnahme des Rostes auf den Erwärmungsprozess konnte als vernachlässigbar nachgewiesen werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung und energetische Untersuchung eines vielversprechenden Konzepts zur induktiven Erwärmung eines durchströmten Speichermediums. Dafür wurden zunächst die Anforderungen an das zu entwickelnde Konzept im Hinblick auf einen Einsatz im Kraftwerksmaßstab definiert. Das Anforderungsprofil sah hierbei einen Temperaturgradienten von mindestens 200 K zur Beladung eines sensiblen Wärmespeichers, eine schnelle Bereitstellung von negativer Regelleistung und die Erzielung eines Gesamtwirkungsgrades von mehr als 70 % vor.

Anschließend wurden drei Konzepte entwickelt die für solch ein Anforderungsprofil geeignet sein könnten. Das erste Konzept sah den Einsatz von Rundstäben und das zweite den Einsatz einer Kugelschüttung vor. Das dritte Konzept bildete ein Blech dessen Form an eine Blume erinnert. Aufgrund der Komplexität des zweiten und dritten Konzepts fiel die Entscheidung für die energetische Untersuchung auf das erste Konzept. Hierdurch sollte die aufgestellte These einer höheren induzierten Leistung und einer Erhöhung der thermischen Leistungsübertragung auf den Luftstrom, durch eine Steigerung der Stabanzahl bestätigt werden.

Für die experimentellen Untersuchungen wurde der bereits vorhandene Teststand umgebaut. Während der Versuche wurden Messdaten zu Temperatur, Volumenstrom und elektrische Leistungsdaten erfasst. Wichtig für den Nachweis der aufgestellten These waren vor allem die Messung der Luftaus- und Lufteintrittstemperatur, der Generatorleistung und die Kühlwasseraus- und Kühlwassereintrittstemperaturen der Induktionsanlage. Mit diesen Messdaten sollten die mittleren Luftaustrittstemperaturen und der elektrische, thermische und der Gesamtwirkungsgrad berechnet werden. Innerhalb des Konzepts der Rundstäbe sollten vier Anordnungen mit einer steigenden Anzahl an gleich großen Stäben von 30 mm im Durchmesser untersucht werden. Die Prozessparameter wurden auf eine Wirkleistung von 5 kW und 10 kW und Nennvolumenströme von 25, 50, 75 und 100 m³/h festgelegt. Zunächst wurden eine Feldvermessung und eine Vermessung des Rostes durchgeführt um eventuelle Einflüsse auf eine Erwärmung der Stabanordnungen im Nachhinein nachvollziehen zu können. Um den Erwärmungsverlauf abzubilden sollten Infrarotaufnahmen von der Anordnung mit 5 Stäben erstellt werden.

Die Auswertung der Messdaten konnte zunächst die Einflussnahme der Feldinhomogenität auf eine ungleichmäßige Erwärmung der Stabanordnungen bestätigen und die des Rostes als vernachlässigbar nachweisen. Durch die Infrarotaufnahmen konnte der unregelmäßige Erwärmungsverlauf sichtbar gemacht werden. Mit Hilfe der experimentellen Untersuchungen konnte die vermutete Korrelation zwischen zunehmender Stabanzahl und steigendem elektrischen, thermischen und Gesamtwirkungsgrad bestätigt werden. Die Anordnung mit 16 Stäben erreichte dabei elektrische Wirkungsgrade von über 90 % und thermische Wirkungsgrade von annähernd 70 %. Die erzielten Gesamtwirkungsgrade lagen annähernd bei 65 %. Die Anforderung an einen thermischen Wirkungsgrad von mehr als 70 % wurde damit verfehlt. Weiterhin konnten mittlere Luftaustrittstemperaturen von fast 500 °C mit dieser Anordnung erzielt werden. Die Anforderung eines Temperaturgradienten von mehr als 200 K, bei Lufteintrittstemperaturen von etwa 25 °C, wurde somit erfüllt.

Im Hinblick auf den Einsatz im Kraftwerksmaßstab zeigt sich das untersuchte Konzept der Rundstäbe damit als vielversprechend, da die aufgestellten Anforderungen zum größten Teil erfüllt werden. Für den gewählten Durchmesser von 30 mm konnte eine schnelle Erwärmung der Stäbe auf Temperaturen von über 600 °C erzielt werden. Damit wäre dieses System sehr gut geeignet, um schnell negative Regelleistung zur Verfügung zu stellen und mit der entstehenden Wärme einen sensiblen thermischen Speicher zu beladen. Die Beladung eines Hochtemperaturspeichers mit Temperaturen von mehr als 500 °C ist somit denkbar.

Innerhalb des Konzeptes der Stäbe wurde nur ein Durchmesser mit vier Anordnungen untersucht. Für nachfolgende Arbeiten bietet es sich daher an weitere Variationen in Bezug auf die induzierte Leistung, den Stabdurchmesser, den verwendeten Werkstoff, die Stabanzahl und damit auch die Packungsdichte, sowie weiteren Anordnungen vorzunehmen. Weiterhin wäre eine Messung des Differenzdrucks in Abhängigkeit von Durchmesser, Temperatur, Packungsdichte und Stabanordnung im Hinblick auf eine Effizienzsteigerung des Systems interessant. Gerade bei kleinen Stabdurchmessern ist aufgrund der Abnahme der Hohlraumgröße bei gleicher Packungsdichte im Vergleich zu größeren Stabdurchmessern, eine deutliche Zunahme des statischen Druckverlustes zu erwarten. Eine dichte Packung von Stäben kleinen Durchmessers könnte zudem eine abschirmende Wirkung auf das elektromagnetische Feld haben und eine Erwärmung, der im Inneren der

Stabpackung befindlichen Stäbe, deutlich beeinträchtigen. Ein weiterer Effekt der während der experimentellen Untersuchungen beobachtet werden konnte, war die Verzunderung der Stäbe bei den erzielten Temperaturen. Der auftretende Materialverlust an der Oberfläche des Werkstoffs, aufgrund von oxidierenden Gasen, könnte im Dauerbetrieb für eine Verschmutzung der Anlage und eine Beeinträchtigung der Wärmeübertragung sorgen. Es sollten daher Werkstoffe mit einer höheren Zunderbeständigkeit eingesetzt werden. Hierfür geeignet wären etwa hitzebeständige Stähle die beim Bau von Industrieöfen oder Dampfkesseln zum Einsatz kommen.

Die Untersuchung des in Kapitel 3 vorgestellten Konzepts einer Kugelschüttung bietet weitere Möglichkeiten für energetische Untersuchungen. Vielversprechend ist dabei das im Vergleich zum Konzept der Stäbe bessere Verhältnis von Oberfläche zu Volumen. Dadurch steht bei gleicher Schüttungshöhe eine größere Fläche für die Wärmeübertragung zur Verfügung. Innerhalb dieses Konzeptes ist eine Parametervariation ähnlich zum Konzept der Rundstäbe denkbar. Dazu könnten unterschiedliche Kugeldurchmesser, Werkstoffe und Schüttverfahren untersucht werden. Die Verkleinerung der Hohlräume könnte jedoch ähnlich zum Konzept der Rundstäbe eine deutliche Zunahme des statischen Druckverlustes verursachen.

6 Literaturverzeichnis

- [1] AG Energiebilanzen e.V.: Veränderung des Primärenergieverbrauchs im Jahr 2015, 2016. <http://www.ag-energiebilanzen.de/21-0-Infografik.html>, abgerufen am: 25.06.2016
- [2] Beer, M.: Potenzial funktionaler Speicher mit flexibler Kraft-Wärme-Kopplung. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, S. 8–10
- [3] Michael Sterner u. Ingo Stadler: Energiespeicher. Bedarf, Technologien, Integration. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2014
- [4] Agora Energiewende: Speicher in der Energiewende. Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilnetz (2014), S. 12–14
- [5] Andreas Hauer, Stefan Hiebler u. Manfred Reuß: Wärmespeicher. BINE-Informationsdienst 2013
- [6] Dr.-Ing. K. Kegel: Elektrowärme. Theorie und Praxis. Essen: W. Girardet 1974
- [7] Dr. W. Classen: Industrielle Elektrowärme. Essen: Vulkan-Verlag 1970
- [8] Günter Benkowsky: Induktionserwärmung. Härten Glühen Schmelzen Löten Schweißen. Berlin: VEB Verlag Technik 1980
- [9] Jörg Fasholz: Induktive Erwärmung. Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen. Heidelberg: Energie-Verlag GmbH 1984
- [10] Eurotherm: Hochöfen und Winderhitzer. <http://www.eurotherm.de/blast-furnace-and-stoves>, abgerufen am: 30.06.2016
- [11] Uwe Niklas: N-ERGIE Wärmespeicher in Sandreuth. <https://www.nuernberg.de/internet/klimaschutz/leuchtturmprojekte.html>, abgerufen am: 26.07.2016
- [12] N-ERGIE AG: Wärmespeicher der N-ERGIE. Inbetriebnahme erfolgreich. Nürnberg 2015
- [13] Sergej Belik: Entwicklung von Konzepten der induktiven Erwärmung in thermischen Hochtemperatur-Energiespeichern, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Masterarbeit. Leipzig 2015
- [14] Maxim Khoklov: Die lokale Porositätsverteilung in Füllkörperschüttungen und ihre Auswirkung auf den Gegenstrom von Flüssigkeiten und Gas, Technische Universität Bergakademie Dissertation. Freiberg 2001

7 Abkürzungsverzeichnis

A	Rohrquerschnittsfläche
B	Magnetische Flussdichte
c_p	Spezifische Wärmekapazität
dA	Flächenelement
D_w	Werkstückdurchmesser
f	Frequenz
H	Magnetische Feldstärke
J	Stromdichte
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
P_0	Summe aus P_{ind} und P_{Sp}
PCM	Phase Change Materials
P_{ind}	Induzierte Leistung
P_{Sp}	Wärmeverluste der Spule
P_{th}	Thermische Leistung
V	Luftvolumenstrom
w	Strömungsgeschwindigkeit
δ	Stromeindringtiefe
η_{el}	Elektrischer Wirkungsgrad
η_{Ges}	Gesamtwirkungsgrad
η_{th}	Thermischer Wirkungsgrad
ϑ_{ein}	Lufteintrittstemperatur
ϑ_m	Mittlere Luftaustrittstemperatur
μ	Permeabilität
μ_r	Permeabilitätszahl
ρ	Spezifischer elektrischer Widerstand / Dichte
Φ	Magnetische Flussdichte

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Leistungsdichten unterschiedlicher Erwärmungsarten.....	7
Tabelle 2 Übersicht der Kosten verschiedener Speichersysteme	10
Tabelle 3 Abmessungen des Induktors	22
Tabelle 4 Implementierte Messtechnik	24
Tabelle 5 Messwerte der Feldvermessung	36
Tabelle 6 Messwerte Rost und Halterung	37
Tabelle 7 Werte zur Berechnung der induktiven Wirkungsgrade bei 5 kW	59
Tabelle 8 Werte zur Berechnung der induktiven Wirkungsgrade bei 10 kW	60
Tabelle 9 Werte zur Berechnung der thermischen Wirkungsgrade bei 5 kW	61
Tabelle 10 Werte zur Berechnung der thermischen Wirkungsgrade bei 10 kW	62
Tabelle 11 Gesamtwirkungsgrade bei 5 und 10 kW.....	63
Tabelle 12 Werte zur Berechnung der mittleren Luftaustrittstemperaturen bei 5 kW (5 Stäbe).....	64
Tabelle 13 Werte zur Berechnung der mittleren Luftaustrittstemperaturen bei 5 kW (7 Stäbe).....	65
Tabelle 14 Werte zur Berechnung der mittleren Luftaustrittstemperaturen bei 5 kW (9 Stäbe).....	66
Tabelle 15 Werte zur Berechnung der mittleren Luftaustrittstemperaturen bei 5 kW (16 Stäbe).....	67
Tabelle 16 Werte zur Berechnung der mittleren Luftaustrittstemperaturen bei 10 kW (5 Stäbe).....	68
Tabelle 17 Werte zur Berechnung der mittleren Luftaustrittstemperaturen bei 10 kW (7 Stäbe).....	69
Tabelle 18 Werte zur Berechnung der mittleren Luftaustrittstemperaturen bei 10 kW (9 Stäbe).....	70
Tabelle 19 Werte zur Berechnung der mittleren Luftaustrittstemperaturen bei 10 kW (16 Stäbe).....	71
Tabelle 20 Mittlere Luftaustrittstemperaturen bei 5 kW	72
Tabelle 21 Mittlere Luftaustrittstemperaturen bei 10 kW	73

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Prinzip der unmittelbaren Widerstandserwärmung	3
Abbildung 2 Prinzip der mittelbaren Widerstandserwärmung	4
Abbildung 3 Induktive Erwärmung eines Metallzylinders.....	5
Abbildung 4 Arbeits- und Leistungskreis einer Induktionsanlage	6
Abbildung 5 Stromeindringtiefe	7
Abbildung 6 Übersicht Speichertechnologien thermischer Energiespeicher	8
Abbildung 7 Übersicht PCM Schmelztemperaturen und -energie	11
Abbildung 8 Wärmespeicher der N-ERGIE AG in Nürnberg.....	13
Abbildung 9 Varianten des Integrationsortes des Induktionssystems	14
Abbildung 10 Induktionsrohr mit Längsrippen	15
Abbildung 11 Zeichnung des Konzepts "Blume"	18
Abbildung 12 Stahlbehälter mit Einbauten	20
Abbildung 13 MF-Generator	21
Abbildung 14 Kompensationsfeld/Schwingkreis mit Induktor (Beispiel)	21
Abbildung 16 Auszug Fließschema Induktionssystem	25
Abbildung 15 Messpunkte Stufenthermoelemente	26
Abbildung 17 Optimale Leistungsabsorption in Abhängigkeit von x_2	28
Abbildung 18 Anordnung mit 5 Stäben.....	29
Abbildung 19 Anordnung mit 7 Stäben.....	29
Abbildung 20 Anordnung mit 9 Stäben.....	29
Abbildung 21 Anordnung mit 16 Stäben.....	30
Abbildung 22 Messpunkte Feldvermessung	31
Abbildung 23 Messpunkte Rost und Halterung	32
Abbildung 24 Versuchsanordnung der thermografischen Vermessung	33
Abbildung 25 Platzierung der Stufenthermoelemente am Stab.....	34
Abbildung 26 Anordnung Thermoelement Lufteintritt	34
Abbildung 27 Messpunkte Luftaustrittstemperatur	35
Abbildung 28 IR-Aufnahme nach 60 s.....	38
Abbildung 29 IR-Aufnahme nach 180 s.....	38
Abbildung 30 IR-Aufnahme nach 300 s.....	38
Abbildung 31 IR-Aufnahme nach 420 s.....	39
Abbildung 32 IR-Aufnahme nach 540 s.....	39
Abbildung 33 Elektrische Wirkungsgrade bei 5 kW.....	40
Abbildung 34 Elektrische Wirkungsgrade bei 10 kW.....	41
Abbildung 35 Mittlere Luftaustrittstemperaturen bei 5 kW	43
Abbildung 36 Mittlere Luftaustrittstemperaturen bei 10 kW	44
Abbildung 37 Thermische Wirkungsgrade bei 5 kW	45
Abbildung 38 Thermische Wirkungsgrade bei 10 kW	46
Abbildung 39 Gesamtwirkungsgrade bei 5 kW	47

Abbildung 40 Gesamtwirkungsgrade bei 10 kW	48
--	----

10 Anhang

Anhang A – Messdaten und Berechnungsergebnisse

Tabelle 7 Werte zur Berechnung der induktiven Wirkungsgrade bei 5 kW

Generatorleistung 5 kW

5 Stäbe

V in m ³ /h (i.N.)	ϑ_{Aus} in °C	ϑ_{Ein} in °C	dT in °C	ρ_w in kg/m ³	c_w in kJ/kg*K	$V_{\text{kühl}}$ in l/s	$V_{\text{kühl}}$ in kg/s	P_{Sp} in kW	P_0 in kW	P_{ind} in kW	η_{Ind} in %
25	31,13	22,89	8,24	995,30	4,182	0,03333	0,03318	1,14	5,00	3,86	77,13
50	30,07	23,39	6,68	995,63	4,182	0,03333	0,03319	0,93	5,00	4,07	81,46
75	29,47	23,53	5,94	995,81	4,182	0,03333	0,03319	0,82	5,00	4,18	83,51
100	28,68	23,14	5,54	996,04	4,182	0,03333	0,03320	0,77	5,00	4,23	84,62

7 Stäbe

V in m ³ /h (i.N.)	ϑ_{Aus} in °C	ϑ_{Ein} in °C	dT in °C	ρ_w in kg/m ³	c_w in kJ/kg*K	$V_{\text{kühl}}$ in l/s	$V_{\text{kühl}}$ in kg/s	P_{Sp} in kW	P_0 in kW	P_{ind} in kW	η_{Ind} in %
25	30,93	23,54	7,39	995,36	4,182	0,03333	0,03318	1,03	5,00	3,97	79,49
50	28,06	21,96	6,10	996,22	4,182	0,03333	0,03321	0,85	5,00	4,15	83,06
75	28,16	22,97	5,19	996,19	4,182	0,03333	0,03321	0,72	5,00	4,28	85,59
100	27,66	23,04	4,62	996,33	4,182	0,03333	0,03321	0,64	5,00	4,36	87,17

9 Stäbe

V in m ³ /h (i.N.)	ϑ_{Aus} in °C	ϑ_{Ein} in °C	dT in °C	ρ_w in kg/m ³	c_w in kJ/kg*K	$V_{\text{kühl}}$ in l/s	$V_{\text{kühl}}$ in kg/s	P_{Sp} in kW	P_0 in kW	P_{ind} in kW	η_{Ind} in %
25	28,30	21,75	6,55	996,15	4,182	0,03333	0,03321	0,91	5,00	4,09	81,81
50	27,31	21,40	5,91	996,43	4,182	0,03333	0,03321	0,82	5,00	4,18	83,58
75	26,61	21,59	5,02	996,62	4,182	0,03333	0,03322	0,70	5,00	4,30	86,05
100	26,12	21,89	4,23	996,76	4,182	0,03333	0,03323	0,59	5,00	4,41	88,24

16 Stäbe

V in m ³ /h (i.N.)	ϑ_{Aus} in °C	ϑ_{Ein} in °C	dT in °C	ρ_w in kg/m ³	c_w in kJ/kg*K	$V_{\text{kühl}}$ in l/s	$V_{\text{kühl}}$ in kg/s	P_{Sp} in kW	P_0 in kW	P_{ind} in kW	η_{Ind} in %
25	29,97	23,06	6,91	995,66	4,182	0,03333	0,03319	0,96	5,00	4,04	80,82
50	28,05	23,48	4,57	996,22	4,182	0,03333	0,03321	0,63	5,00	4,37	87,31
75	25,74	22,32	3,42	996,85	4,182	0,03333	0,03323	0,48	5,00	4,52	90,50
100	25,16	22,41	2,75	997,00	4,182	0,03333	0,03323	0,38	5,00	4,62	92,36

Tabelle 8 Werte zur Berechnung der induktiven Wirkungsgrade bei 10 kW

Generatorleistung 10 kW

5 Stäbe

V in m ³ /h (i.N.)	ϑ_{Aus} in °C	ϑ_{Ein} in °C	dT in °C	ρ_w in kg/m ³	c_w in kJ/kg*K	$V_{\text{kühl}}$ in l/s	$V_{\text{kühl}}$ in kg/s	P_{Sp} in kW	P_0 in kW	P_{ind} in kW	η_{Ind} in %
25	47,19	26,06	21,13	989,29	4,182	0,03333	0,03298	2,91	10,00	7,09	70,86
50	44,21	25,09	19,12	990,55	4,182	0,03333	0,03302	2,64	10,00	7,36	73,60
75	42,27	24,99	17,28	991,33	4,182	0,03333	0,03304	2,39	10,00	7,61	76,12
100	40,87	25,18	15,69	991,88	4,182	0,03333	0,03306	2,17	10,00	7,83	78,31

7 Stäbe

V in m ³ /h (i.N.)	ϑ_{Aus} in °C	ϑ_{Ein} in °C	dT in °C	ρ_w in kg/m ³	c_w in kJ/kg*K	$V_{\text{kühl}}$ in l/s	$V_{\text{kühl}}$ in kg/s	P_{Sp} in kW	P_0 in kW	P_{ind} in kW	η_{Ind} in %
25	42,17	23,46	18,71	991,37	4,182	0,03333	0,03305	2,59	10,00	7,41	74,14
50	39,97	24,14	15,83	992,23	4,182	0,03333	0,03307	2,19	10,00	7,81	78,10
75	36,59	22,66	13,93	993,48	4,182	0,03333	0,03312	1,93	10,00	8,07	80,71
100	36,38	24,20	12,18	993,55	4,182	0,03333	0,03312	1,69	10,00	8,31	83,13

9 Stäbe

V in m ³ /h (i.N.)	ϑ_{Aus} in °C	ϑ_{Ein} in °C	dT in °C	ρ_w in kg/m ³	c_w in kJ/kg*K	$V_{\text{kühl}}$ in l/s	$V_{\text{kühl}}$ in kg/s	P_{Sp} in kW	P_0 in kW	P_{ind} in kW	η_{Ind} in %
25	41,38	23,15	18,23	991,69	4,182	0,03333	0,03306	2,52	10,00	7,48	74,80
50	38,03	22,59	15,44	992,96	4,182	0,03333	0,03310	2,14	10,00	7,86	78,63
75	35,45	22,52	12,93	993,88	4,182	0,03333	0,03313	1,79	10,00	8,21	82,09
100	34,28	23,11	11,17	994,28	4,182	0,03333	0,03314	1,55	10,00	8,45	84,52

16 Stäbe

V in m ³ /h (i.N.)	ϑ_{Aus} in °C	ϑ_{Ein} in °C	dT in °C	ρ_w in kg/m ³	c_w in kJ/kg*K	$V_{\text{kühl}}$ in l/s	$V_{\text{kühl}}$ in kg/s	P_{Sp} in kW	P_0 in kW	P_{ind} in kW	η_{Ind} in %
25	39,98	23,65	16,33	992,23	4,182	0,03333	0,03307	2,26	10,00	7,74	77,41
50	36,81	24,14	12,67	993,40	4,182	0,03333	0,03311	1,75	10,00	8,25	82,45
75	31,87	22,84	9,03	995,07	4,182	0,03333	0,03317	1,25	10,00	8,75	87,47
100	30,84	23,49	7,35	995,39	4,182	0,03333	0,03318	1,02	10,00	8,98	89,80

Tabelle 9 Werte zur Berechnung der thermischen Wirkungsgrade bei 5 kW

Generatorleistung 5 kW

5 Stäbe

V in m ³ /h (i.N.)	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus}$ in kJ/kg*K	$\vartheta_{L,Ein}$ in °C	w_m in m/s	A_{Rohr} in m ²	m in kg/s	P_{th} in kW	η_{th} in %
25	298,18	0,599	1,0460	26,70	0,44	0,01573	0,0042	1,18	30,64
50	214,36	0,702	1,0390	25,30	0,88	0,01573	0,0098	1,92	47,04
75	178,46	0,758	1,0365	24,40	1,32	0,01573	0,0158	2,52	60,40
100	153,69	0,802	1,0350	24,40	1,77	0,01573	0,0223	2,98	70,47

7 Stäbe

V in m ³ /h (i.N.)	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus}$ in kJ/kg*K	$\vartheta_{L,Ein}$ in °C	w_m in m/s	A_{Rohr} in m ²	m in kg/s	P_{th} in kW	η_{th} in %
25	347,91	0,551	1,0508	26,80	0,44	0,01573	0,0038	1,29	32,50
50	248,75	0,656	1,0417	26,70	0,88	0,01573	0,0091	2,11	50,75
75	196,81	0,729	1,0378	25,80	1,32	0,01573	0,0152	2,69	62,94
100	167,74	0,777	1,0358	25,10	1,77	0,01573	0,0216	3,19	73,13

9 Stäbe

V in m ³ /h (i.N.)	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus}$ in kJ/kg*K	$\vartheta_{L,Ein}$ in °C	w_m in m/s	A_{Rohr} in m ²	m in kg/s	P_{th} in kW	η_{th} in %
25	360,60	0,540	1,0521	25,20	0,44	0,01573	0,0038	1,32	32,36
50	268,80	0,632	1,0434	25,80	0,88	0,01573	0,0088	2,22	53,23
75	219,79	0,695	1,0394	26,00	1,32	0,01573	0,0145	2,91	67,74
100	180,75	0,754	1,0367	25,40	1,77	0,01573	0,0210	3,37	76,47

16 Stäbe

V in m ³ /h (i.N.)	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus}$ in kJ/kg*K	$\vartheta_{L,Ein}$ in °C	w_m in m/s	A_{Rohr} in m ²	m in kg/s	P_{th} in kW	η_{th} in %
25	361,77	0,539	1,0522	26,60	0,44	0,01573	0,0037	1,32	32,68
50	278,73	0,620	1,0443	23,60	0,88	0,01573	0,0086	2,30	52,59
75	218,20	0,697	1,0393	22,70	1,32	0,01573	0,0145	2,95	65,18
100	177,80	0,759	1,0365	22,50	1,77	0,01573	0,0211	3,39	73,51

Tabelle 10 Werte zur Berechnung der thermischen Wirkungsgrade bei 10 kW

Generatorleistung 10 kW

5 Stäbe

V in m ³ /h (i.N.)	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus}$ in kJ/kg*K	$\vartheta_{L,Ein}$ in °C	w_m in m/s	A_{Rohr} in m ²	m in kg/s	P_{th} in kW	η_{th} in %
25	372,97	0,530	1,0534	23,40	0,44	0,01573	0,0037	1,35	19,12
50	280,82	0,618	1,0445	24,00	0,88	0,01573	0,0086	2,30	31,28
75	236,04	0,672	1,0407	24,50	1,32	0,01573	0,0140	3,08	40,51
100	209,66	0,709	1,0387	24,80	1,77	0,01573	0,0197	3,78	48,30

7 Stäbe

V in m ³ /h (i.N.)	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus}$ in kJ/kg*K	$\vartheta_{L,Ein}$ in °C	w_m in m/s	A_{Rohr} in m ²	m in kg/s	P_{th} in kW	η_{th} in %
25	439,30	0,481	1,0605	24,00	0,44	0,01573	0,0033	1,47	19,82
50	334,23	0,564	1,0495	25,50	0,88	0,01573	0,0078	2,54	32,48
75	272,04	0,628	1,0437	26,50	1,32	0,01573	0,0131	3,35	41,54
100	237,47	0,670	1,0408	26,30	1,77	0,01573	0,0186	4,09	49,24

9 Stäbe

V in m ³ /h (i.N.)	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus}$ in kJ/kg*K	$\vartheta_{L,Ein}$ in °C	w_m in m/s	A_{Rohr} in m ²	m in kg/s	P_{th} in kW	η_{th} in %
25	454,87	0,470	1,0622	28,30	0,44	0,01573	0,0033	1,48	19,78
50	348,87	0,550	1,0509	28,40	0,88	0,01573	0,0076	2,57	32,74
75	297,66	0,600	1,0460	28,60	1,32	0,01573	0,0125	3,52	42,84
100	258,65	0,644	1,0425	27,30	1,77	0,01573	0,0179	4,31	51,03

16 Stäbe

V in m ³ /h (i.N.)	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus}$ in kJ/kg*K	$\vartheta_{L,Ein}$ in °C	w_m in m/s	A_{Rohr} in m ²	m in kg/s	P_{th} in kW	η_{th} in %
25	489,30	0,449	1,0661	29,20	0,44	0,01573	0,0031	1,53	19,76
50	403,09	0,506	1,0565	28,70	0,88	0,01573	0,0070	2,78	33,73
75	347,81	0,551	1,0508	22,30	1,32	0,01573	0,0115	3,93	44,92
100	295,50	0,602	1,0458	22,50	1,77	0,01573	0,0167	4,77	53,17

Tabelle 11 Gesamtwirkungsgrade bei 5 und 10 kW

<i>Generatorleistung 5kW</i>		<i>Generatorleistung 10 kW</i>	
5 Stäbe		5 Stäbe	
V in m ³ /h (i.N.)	η_{Ges} in %	V in m ³ /h	η_{Ges} in %
25	23,63	25	13,55
50	38,32	50	23,02
75	50,44	75	30,84
100	59,63	100	37,82
7 Stäbe		7 Stäbe	
V in m ³ /h (i.N.)	η_{Ges} in %	V in m ³ /h	η_{Ges} in %
25	25,83	25	14,70
50	42,15	50	25,37
75	53,87	75	33,53
100	63,74	100	40,93
9 Stäbe		9 Stäbe	
V in m ³ /h (i.N.)	η_{Ges} in %	V in m ³ /h	η_{Ges} in %
25	26,48	25	14,80
50	44,49	50	25,75
75	58,29	75	35,17
100	67,48	100	43,13
16 Stäbe		16 Stäbe	
V in m ³ /h (i.N.)	η_{Ges} in %	V in m ³ /h	η_{Ges} in %
25	26,41	25	15,29
50	45,91	50	27,81
75	58,99	75	39,29
100	67,89	100	47,75

Tabelle 12 Werte zur Berechnung der mittleren Luftaustrittstemperaturen bei 5 kW (5 Stäbe)

<i>Generatorleistung 5kW</i>					
5 Stäbe					
V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
25	0	248,70	0,6559	1,0418	0,0018096
	1	239,20	0,6681	1,0410	0,0028471
	2	311,30	0,5857	1,0473	0,0031974
	3	333,40	0,5643	1,0494	0,0034558
	4	328,60	0,5688	1,0489	0,0044157
V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
50	0	172,50	0,7681	1,0362	0,0018096
	1	164,50	0,7823	1,0356	0,0028471
	2	215,90	0,7001	1,0391	0,0031974
	3	255,40	0,6477	1,0423	0,0034558
	4	239,10	0,6684	1,0409	0,0044157
V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
75	0	141,40	0,8259	1,0343	0,0018096
	1	129,20	0,8509	1,0336	0,0028471
	2	181,50	0,7530	1,0367	0,0031974
	3	220,40	0,6937	1,0395	0,0034558
	4	199,10	0,7250	1,0379	0,0044157
V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
100	0	118,70	0,8737	1,0331	0,0018096
	1	108,90	0,8961	1,0326	0,0028471
	2	158,00	0,7941	1,0352	0,0031974
	3	186,80	0,7444	1,0371	0,0034558
	4	175,30	0,7634	1,0363	0,0044157

Tabelle 13 Werte zur Berechnung der mittleren Luftaustrittstemperaturen bei 5 kW (7 Stäbe)

Generatorleistung 5kW

7 Stäbe

V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
25	0	337,90	0,5603	1,0498	0,0018096
	1	329,40	0,5682	1,0490	0,0028471
	2	340,30	0,5581	1,0501	0,0031974
	3	380,70	0,5236	1,0542	0,0034558
	4	345,50	0,5534	1,0506	0,0044157

V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
50	0	241,40	0,6654	1,0411	0,0018096
	1	227,00	0,6845	1,0400	0,0028471
	2	241,20	0,6656	1,0411	0,0031974
	3	268,70	0,6318	1,0434	0,0034558
	4	257,00	0,6458	1,0424	0,0044157

V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
75	0	181,00	0,7539	1,0367	0,0018096
	1	180,20	0,7552	1,0366	0,0028471
	2	189,30	0,7403	1,0372	0,0031974
	3	209,40	0,7095	1,0387	0,0034558
	4	210,90	0,7073	1,0388	0,0044157

V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
100	0	146,90	0,8151	1,0346	0,0018096
	1	154,90	0,7998	1,0350	0,0028471
	2	163,60	0,7839	1,0356	0,0031974
	3	181,40	0,7532	1,0367	0,0034558
	4	178,10	0,7587	1,0365	0,0044157

Tabelle 14 Werte zur Berechnung der mittleren Luftaustrittstemperaturen bei 5 kW (9 Stäbe)

Generatorleistung 5kW

9 Stäbe

V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
25	0	324,80	0,5726	1,0485	0,0018096
	1	344,60	0,5542	1,0505	0,0028471
	2	355,70	0,5444	1,0516	0,0031974
	3	374,80	0,5284	1,0536	0,0034558
	4	379,90	0,5243	1,0541	0,0044157

V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
50	0	255,10	0,6481	1,0422	0,0018096
	1	244,50	0,6614	1,0414	0,0028471
	2	249,40	0,6552	1,0418	0,0031974
	3	273,90	0,6258	1,0438	0,0034558
	4	303,50	0,5937	1,0465	0,0044157

V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
75	0	190,90	0,7378	1,0373	0,0018096
	1	191,30	0,7371	1,0374	0,0028471
	2	209,70	0,7090	1,0387	0,0031974
	3	221,80	0,6917	1,0396	0,0034558
	4	260,70	0,6413	1,0427	0,0044157

V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
100	0	146,90	0,8151	1,0346	0,0018096
	1	155,90	0,7980	1,0351	0,0028471
	2	171,70	0,7696	1,0361	0,0031974
	3	187,90	0,7426	1,0371	0,0034558
	4	216,30	0,6995	1,0392	0,0044157

Tabelle 15 Werte zur Berechnung der mittleren Luftaustrittstemperaturen bei 5 kW (16 Stäbe)

Generatorleistung 5kW

16 Stäbe

V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
25	0	376,70	0,5268	1,0538	0,0018096
	1	381,10	0,5233	1,0542	0,0028471
	2	385,70	0,5196	1,0547	0,0031974
	3	373,80	0,5292	1,0535	0,0034558
	4	320,40	0,5768	1,0481	0,0044157

V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
50	0	282,40	0,6163	1,0446	0,0018096
	1	290,90	0,6070	1,0454	0,0028471
	2	298,40	0,5990	1,0460	0,0031974
	3	278,10	0,6211	1,0442	0,0034558
	4	257,10	0,6457	1,0424	0,0044157

V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
75	0	220,60	0,6934	1,0395	0,0018096
	1	234,20	0,6748	1,0405	0,0028471
	2	231,80	0,6780	1,0403	0,0031974
	3	214,40	0,7022	1,0390	0,0034558
	4	201,20	0,7218	1,0381	0,0044157

V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
100	0	176,90	0,7607	1,0364	0,0018096
	1	188,90	0,7410	1,0372	0,0028471
	2	186,60	0,7447	1,0371	0,0031974
	3	179,10	0,7570	1,0366	0,0034558
	4	164,30	0,7826	1,0356	0,0044157

Tabelle 16 Werte zur Berechnung der mittleren Luftaustrittstemperaturen bei 10 kW (5 Stäbe)

<i>Generatorleistung 10 kW</i>					
<i>5 Stäbe</i>					
V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
25	0	325,10	0,5723	1,0486	0,0018096
	1	302,90	0,5943	1,0465	0,0028471
	2	382,40	0,5223	1,0543	0,0031974
	3	410,70	0,5006	1,0574	0,0034558
	4	411,70	0,4999	1,0575	0,0044157
V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
50	0	237,60	0,6703	1,0408	0,0018096
	1	218,90	0,6958	1,0394	0,0028471
	2	276,90	0,6224	1,0441	0,0031974
	3	319,80	0,5774	1,0481	0,0034558
	4	321,60	0,5756	1,0482	0,0044157
V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
75	0	198,30	0,7262	1,0379	0,0018096
	1	177,20	0,7602	1,0364	0,0028471
	2	227,50	0,6838	1,0400	0,0031974
	3	281,10	0,6177	1,0445	0,0034558
	4	271,40	0,6287	1,0436	0,0044157
V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
100	0	173,10	0,7672	1,0362	0,0018096
	1	150,70	0,8077	1,0348	0,0028471
	2	207,10	0,7129	1,0385	0,0031974
	3	257,50	0,6452	1,0424	0,0034558
	4	238,20	0,6695	1,0409	0,0044157

Tabelle 17 Werte zur Berechnung der mittleren Luftaustrittstemperaturen bei 10 kW (7 Stäbe)

<i>Generatorleistung 10 kW</i>					
7 Stäbe					
V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
25	0	462,60	0,4653	1,0631	0,0018096
	1	435,30	0,4833	1,0600	0,0028471
	2	418,70	0,4949	1,0582	0,0031974
	3	443,80	0,4775	1,0610	0,0034558
	4	444,50	0,4771	1,0610	0,0044157
V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
50	0	349,30	0,5500	1,0510	0,0018096
	1	320,00	0,5772	1,0481	0,0028471
	2	322,10	0,5752	1,0483	0,0031974
	3	341,10	0,5574	1,0501	0,0034558
	4	341,30	0,5572	1,0502	0,0044157
V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
75	0	282,70	0,6159	1,0446	0,0018096
	1	265,10	0,6361	1,0431	0,0028471
	2	266,40	0,6345	1,0432	0,0031974
	3	280,50	0,6184	1,0444	0,0034558
	4	269,90	0,6304	1,0435	0,0044157
V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
100	0	232,30	0,6773	1,0404	0,0018096
	1	227,10	0,6844	1,0400	0,0028471
	2	231,90	0,6779	1,0404	0,0031974
	3	247,70	0,6573	1,0416	0,0034558
	4	242,70	0,6637	1,0412	0,0044157

Tabelle 18 Werte zur Berechnung der mittleren Luftaustrittstemperaturen bei 10 kW (9 Stäbe)

<i>Generatorleistung 10 kW</i>					
9 Stäbe					
V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
25	0	432,00	0,4855	1,0597	0,0018096
	1	436,00	0,4828	1,0601	0,0028471
	2	448,40	0,4745	1,0615	0,0031974
	3	468,10	0,4619	1,0637	0,0034558
	4	471,90	0,4595	1,0641	0,0044157
V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
50	0	337,50	0,5607	1,0498	0,0018096
	1	326,80	0,5707	1,0487	0,0028471
	2	334,40	0,5635	1,0495	0,0031974
	3	346,90	0,5522	1,0507	0,0034558
	4	382,20	0,5224	1,0543	0,0044157
V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
75	0	282,00	0,6167	1,0446	0,0018096
	1	270,70	0,6295	1,0436	0,0028471
	2	278,50	0,6206	1,0443	0,0031974
	3	295,20	0,6024	1,0458	0,0034558
	4	341,70	0,5568	1,0502	0,0044157
V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
100	0	233,20	0,6761	1,0405	0,0018096
	1	234,00	0,6751	1,0405	0,0028471
	2	245,20	0,6605	1,0414	0,0031974
	3	261,70	0,6401	1,0428	0,0034558
	4	296,20	0,6013	1,0458	0,0044157

Tabelle 19 Werte zur Berechnung der mittleren Luftaustrittstemperaturen bei 10 kW (16 Stäbe)

<i>Generatorleistung 10 kW</i>					
16 Stäbe					
V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
25	0	515,50	0,4341	1,0690	0,0018096
	1	523,70	0,4296	1,0700	0,0028471
	2	510,60	0,4368	1,0685	0,0031974
	3	491,40	0,4478	1,0663	0,0034558
	4	443,60	0,4777	1,0609	0,0044157
V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
50	0	433,60	0,4844	1,0598	0,0018096
	1	436,20	0,4826	1,0601	0,0028471
	2	444,00	0,4774	1,0610	0,0031974
	3	413,90	0,4983	1,0577	0,0034558
	4	340,30	0,5581	1,0501	0,0044157
V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
75	0	349,60	0,5498	1,0510	0,0018096
	1	362,40	0,5387	1,0523	0,0028471
	2	378,30	0,5255	1,0539	0,0031974
	3	348,20	0,5510	1,0508	0,0034558
	4	317,90	0,5792	1,0479	0,0044157
V in m ³ /h (i.N.)	i	$\vartheta_{L,Aus,i}$ in °C	$\rho_{L,Aus,i}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,i}$ in kJ/kg*K	A_i in m ²
100	0	305,00	0,5922	1,0467	0,0018096
	1	315,00	0,5821	1,0476	0,0028471
	2	313,60	0,5835	1,0475	0,0031974
	3	287,00	0,6112	1,0450	0,0034558
	4	274,30	0,6254	1,0439	0,0044157

Tabelle 20 Mittlere Luftaustrittstemperaturen bei 5 kW

<i>Generatorleistung 5 kW</i>											
5 Stäbe						7 Stäbe					
V in m ³ /h (i.N.)						V in m ³ /h (i.N.)					
25	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K			25	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K		
	298,18	0,5992	1,0460				347,91	0,5513	1,0508		
50	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K			50	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K		
	214,36	0,7023	1,0390				248,75	0,6560	1,0417		
75	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K			75	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K		
	178,46	0,7581	1,0365				196,81	0,7285	1,0378		
100	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K			100	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K		
	153,69	0,8021	1,0350				167,74	0,7765	1,0358		
9 Stäbe						16 Stäbe					
V in m ³ /h (i.N.)						V in m ³ /h (i.N.)					
25	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K			25	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K		
	360,60	0,5402	1,0521				361,77	0,5392	1,0522		
50	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K			50	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K		
	268,80	0,6317	1,0434				278,73	0,6204	1,0443		
75	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K			75	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K		
	219,79	0,6945	1,0394				218,20	0,6968	1,0393		
100	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K			100	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K		
	180,75	0,7543	1,0367				177,80	0,7592	1,0365		

Tabelle 21 Mittlere Luftaustrittstemperaturen bei 10 kW

<i>Generatorleistung 10 kW</i>											
5 Stäbe						7 Stäbe					
V in m ³ /h (i.N.)						V in m ³ /h (i.N.)					
25	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K			25	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K		
	372,97	0,5299	1,0534				439,30	0,4805	1,0605		
50	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K			50	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K		
	280,82	0,6180	1,0445				334,23	0,5637	1,0495		
75	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K			75	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K		
	236,04	0,6724	1,0407				272,04	0,6280	1,0437		
100	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K			100	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K		
	209,66	0,7091	1,0387				237,47	0,6705	1,0408		
9 Stäbe						16 Stäbe					
V in m ³ /h (i.N.)						V in m ³ /h (i.N.)					
25	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K			25	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K		
	454,87	0,4703	1,0622				489,30	0,4490	1,0661		
50	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K			50	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K		
	348,87	0,5504	1,0509				403,09	0,5063	1,0565		
75	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K			75	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K		
	297,66	0,5998	1,0460				347,81	0,5513	1,0508		
100	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K			100	$\vartheta_{L,Aus,m}$ in °C	$\rho_{L,Aus,m}$ in kg/m ³	$c_{p,L,Aus,m}$ in kJ/kg*K		
	258,65	0,6438	1,0425				295,50	0,6021	1,0458		

Anhang C – Technische Zeichnungen

Lufteinlass

Deckel

Strömungsgleichrichter

Trägerplatte (Dural)

Stütze

Quarzglasrohr

Induktor

Stufenthermoelemente

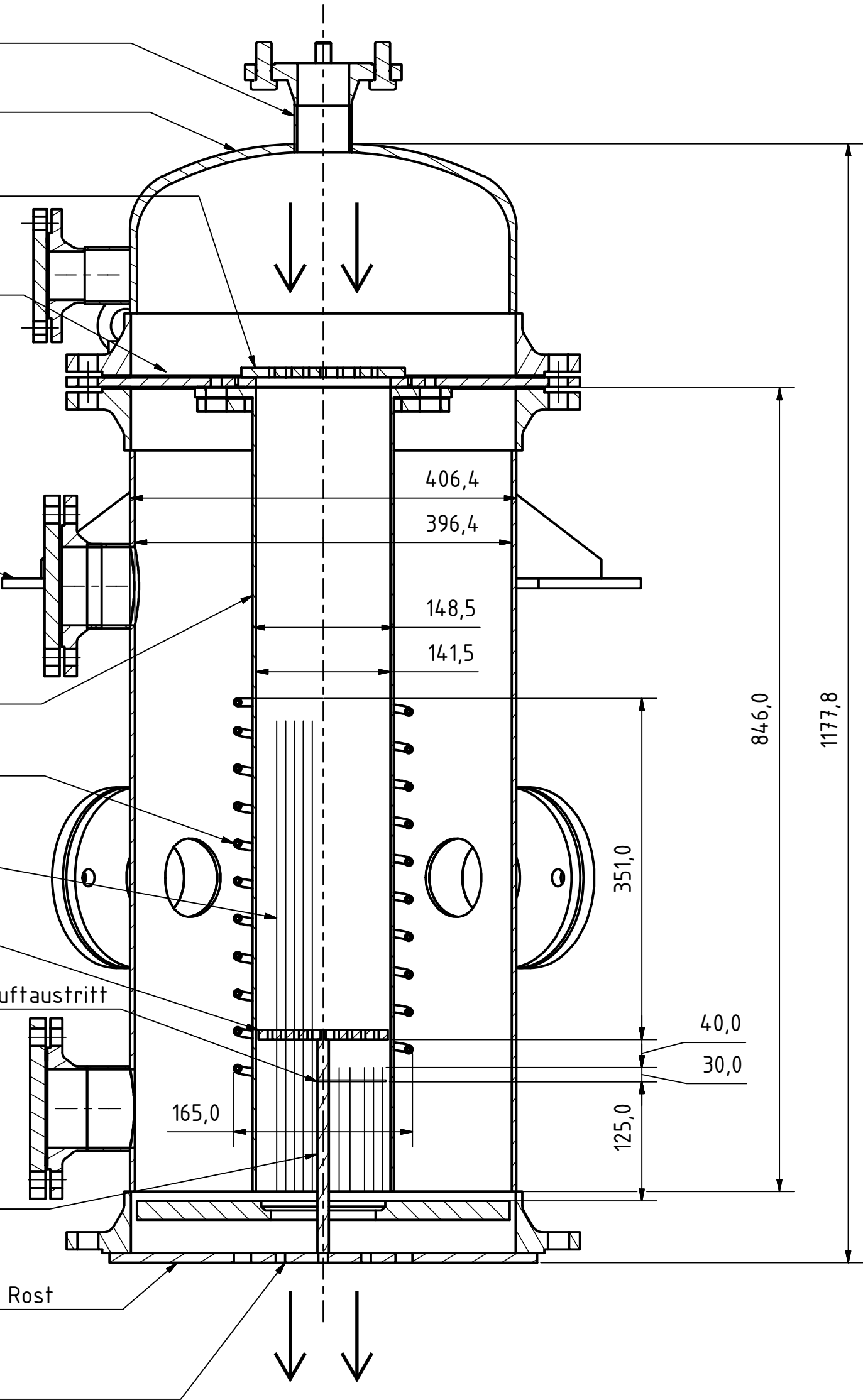
Rost

Halterung und Thermoelemente Luftaustritt

Haltestange Rost

Trägerplatte für Rost/Halterung Rost

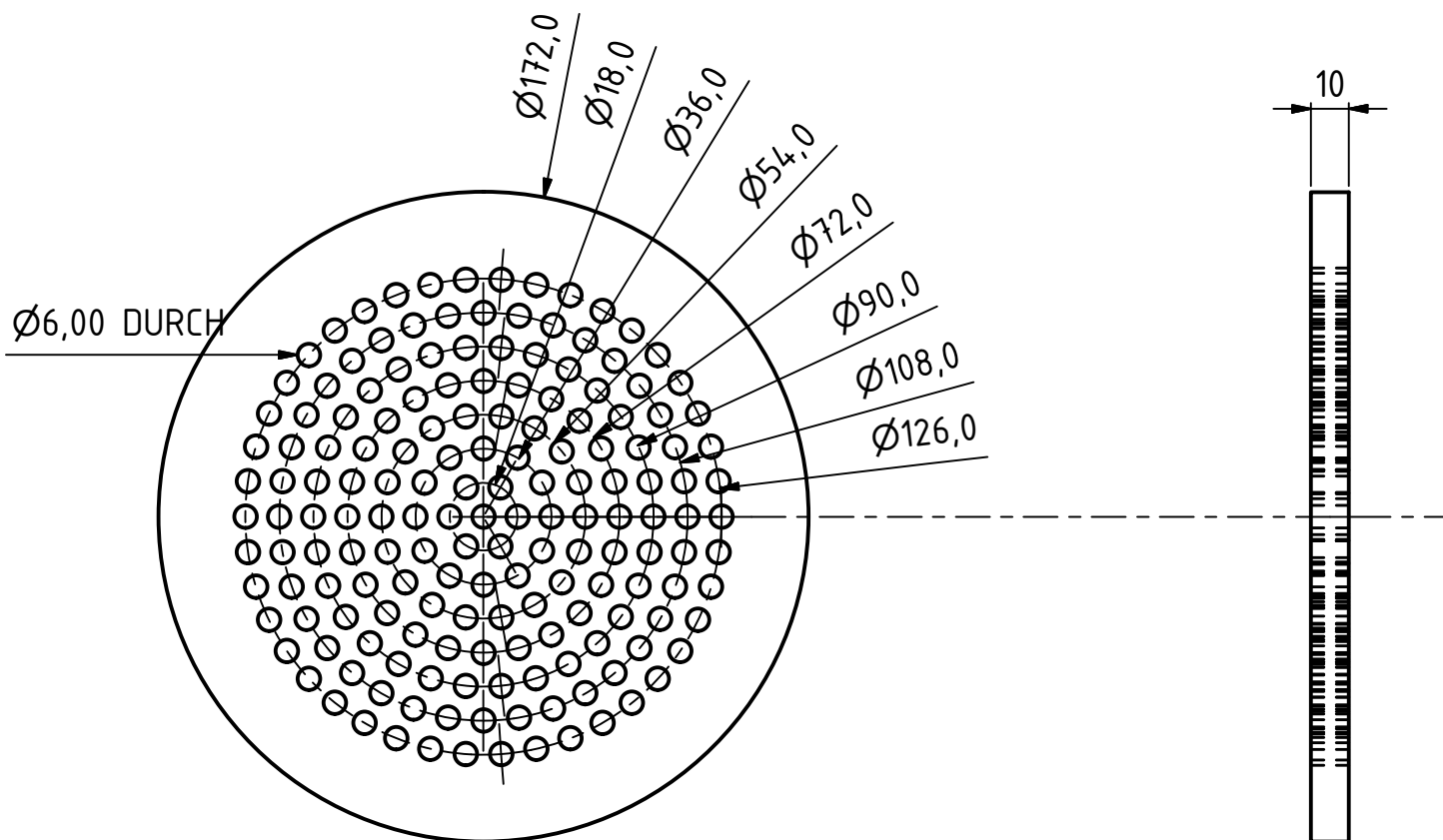
Luftauslass



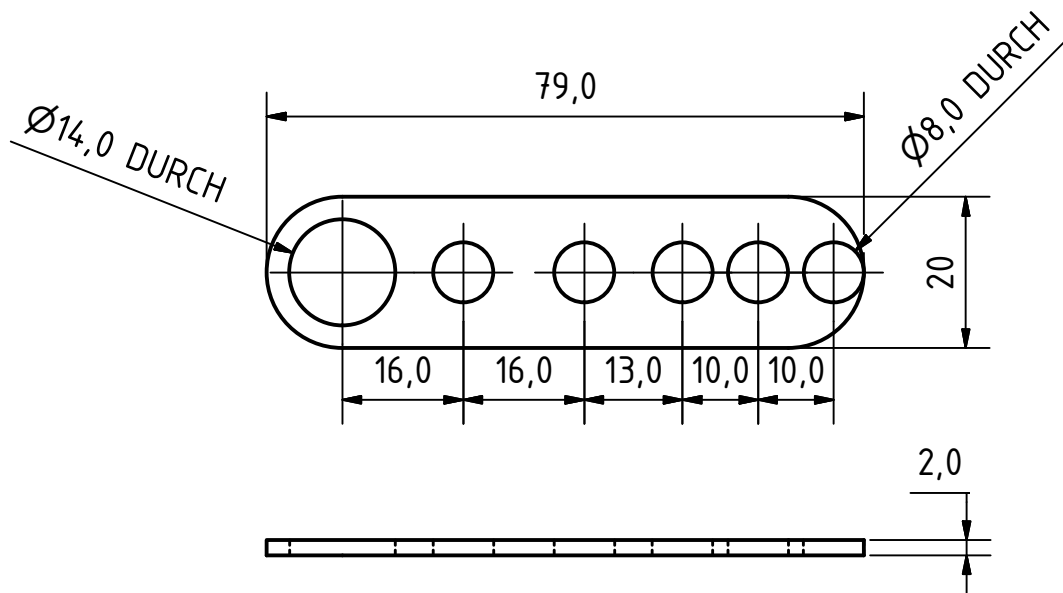
Werkstückkanten DIN ISO 13715 Allgemeintoleranz ISO 2768 -mK Tolerierung DIN 7167				Status: In Bearbeitung		Oberfläche DIN ISO 1302	Maßstab: 1:5 (Werkstoff, Halbzeug)	Gewicht: N/A
				Gezeichnet	Datum 07.04.2016	Name Ian Jones	Titel: Induktionsanlage Projekt:	
				Kontrolliert				
				Norm				
				Firma: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.			Bauteilnummer:	
Zust.	Änderungen	Datum	Name	Datei: Zusammenbau_gesamt.iam				CAD-System: Inventor 2015 Prof.

DLR

Blatt:
1
A3



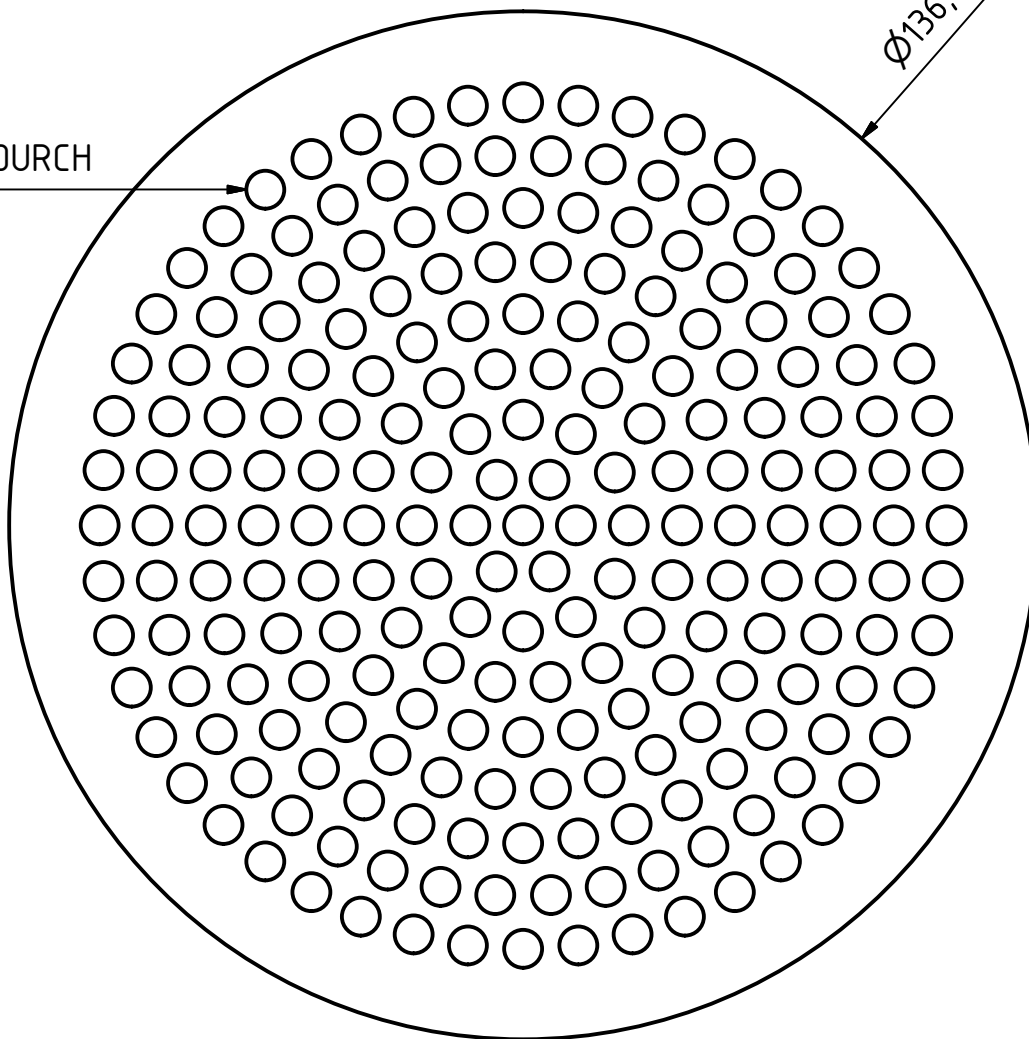
Werkstückkanten DIN ISO 13715 Allgemeintoleranz ISO 2768 -mK Tolerierung DIN 7167				Status: WorkInProgress		Oberfläche DIN ISO 1302		Maßstab: 1:1		Gewicht: -	
								(Werkstoff, Halbzeug)			
				Datum		Name		Titel: Gleichrichter Projekt: IVAN			
				Gezeichnet 14.04.2016		jone_ia					
				Kontrolliert							
				Norm							
				Firma:		 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.		Bauteilnummer:		Blatt:	
										1	
Zust.				Änderungen		Datum		Name		Datei: Gleichrichter_Einsatz.ipt	
										CAD-System: Inventor 2015 Prof.	




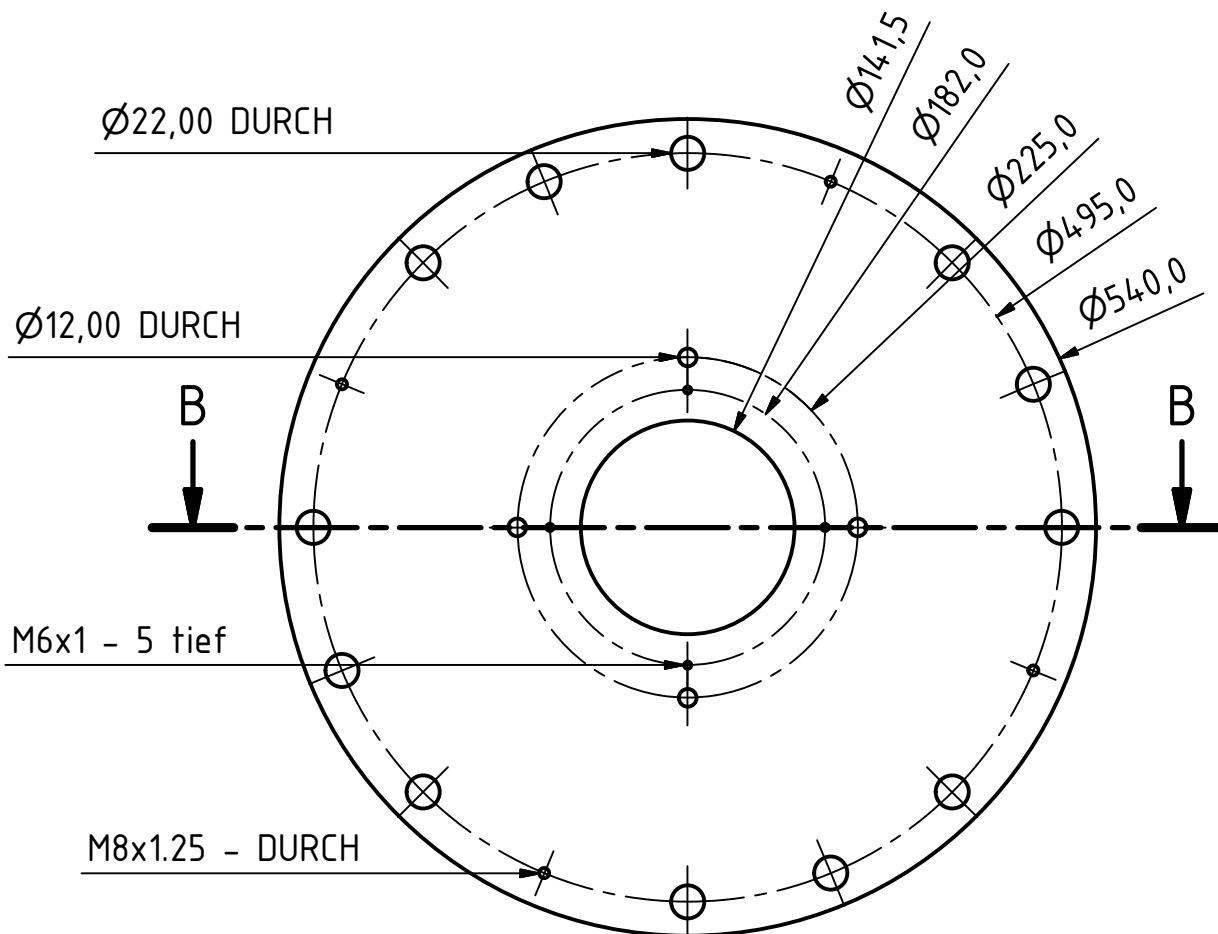
Werkstückkanten DIN ISO 13715 Allgemeintoleranz ISO 2768 -mK Tolerierung DIN 7167				Status: WorkInProgress		Oberfläche DIN ISO 1302		Maßstab: 1:1		Gewicht: -		
								(Werkstoff, Halbzeug)				
					Datum	Name		Titel: Halterung TE Luftaustritt Projekt: IVAN				
				Gezeichnet	30.05.2016	jone_ia						
				Kontrolliert								
				Norm								
				Firma:						Bauteilnummer:		Blatt:
				Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.								
Zust.	Änderungen	Datum	Name	Datei: Halterung_TE_Luftaustritt.ipt					CAD-System: Inventor 2015 Prof.			A4

Ø5,0 DURCH

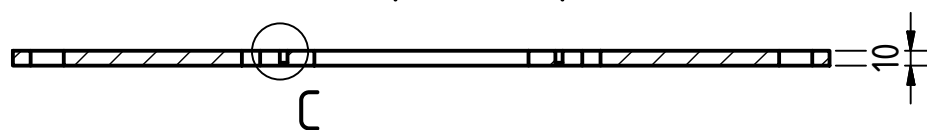
Ø136,0



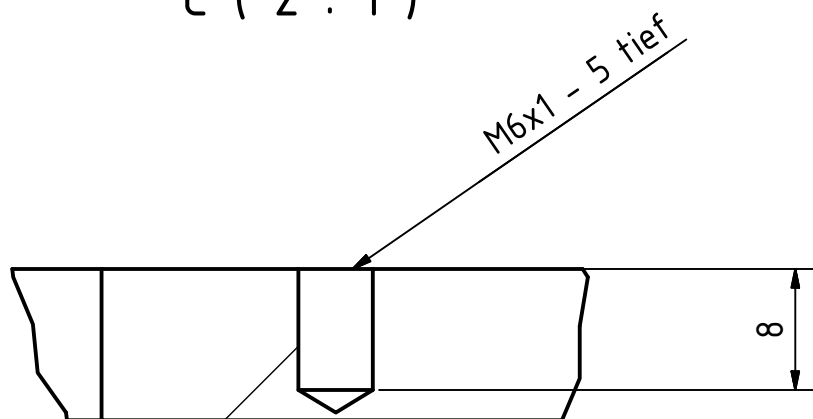
Werkstückkanten DIN ISO 13715 Allgemeintoleranz ISO 2768 -mK Tolerierung DIN 7167				Status:		Oberfläche		Maßstab: 1:1		Gewicht: -		
				WorkInProgress		DIN ISO 1302		(Werkstoff, Halbzeug)				
				Datum	Name	Titel: Rohst Projekt: IVAN						
				Gezeichnet	18.04.2016							jone_ia
				Kontrolliert								
				Norm								
				Firma:		 DLR		Bauteilnummer:		Blatt:		
				Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.						1		
										A4		
Zust.	Änderungen	Datum	Name	Datei: Rost_Schüttung.ipt				CAD-System: Inventor 2015 Prof.				



B-B (1 : 5)



C (2 : 1)



Werkstückkanten DIN ISO 13715 Allgemeintoleranz ISO 2768 -mK Tolerierung DIN 7167				Status: WorkInProgress		Oberfläche DIN ISO 1302		Maßstab: 1:3		Gewicht: -					
								(Werkstoff, Halbzeug)							
					Datum	Name		Titel: Trägerplatte Projekt: IVAN							
				Gezeichnet	13.04.2016	jone_ia									
				Kontrolliert											
				Norm											
				Firma: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.								Bauteilnummer:		Blatt:	
														1	
														A4	
Zust.	Änderungen	Datum	Name	Datei: Trägerplatte Glasrohr und Strömungsgleichrichter.ipt								CAD-System: Inventor 2015 Prof.			